

N° d'enregistrement

du C. N. R. S.

5.791

THESE DE DOCTORAT D'ÉTAT ES SCIENCES APPLIQUÉES

présentée

**A LA FACULTE DES SCIENCES
DE PARIS**

par

JACQUES BARON

pour obtenir

le grade de Docteur ès Sciences

Sujet de thèse : Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment

soutenue le **25 mars 1971** devant la Commission d'Examen

M. SIESTRUNCK

Président

M. VICHNIEVSKY

M. PASQUET

M. PELTIER

}
Examineurs

N° d'enregistrement

du C. N. R. S.

5.791

THESE DE DOCTORAT D'ÉTAT ES SCIENCES APPLIQUÉES

présentée

**A LA FACULTE DES SCIENCES
DE PARIS**

par

JACQUES BARON

pour obtenir

le grade de Docteur ès Sciences

Sujet de thèse : Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment

soutenue le **25 mars 1971** devant la Commission d'Examen

M. SIESTRUNCK

Président

M. VICHNIEVSKY

M. PASQUET

M. PELTIER

}
Examineurs



sommaire

— Avant-propos	5
— Introduction	7
CHAPITRE 1 — Mesure de la variation de longueur d'une éprouvette de béton, mortier ou pâte de ciment, au premier âge	9
1 — Description de l'appareillage	9
2 — Processus opératoire général	14
3 — Caractéristiques d'emploi du dispositif de mesure	16
4 — Variation de longueur de l'éprouvette et déformation du matériau (béton, mortier ou pâte de ciment)	18
5 — Influence du frottement sur la variation de longueur de l'éprouvette	19
6 — Variantes du processus opératoire et définitions	22
7 — Conclusions	25
CHAPITRE 2 — Dispersion expérimentale et variabilité des propriétés du ciment anhydre ..	26
1 — Influence de l'âge du ciment anhydre sur la déformation au premier âge de la pâte de ciment	27
2 — Essai de constitution, en laboratoire, d'un lot de ciment «homogène»	31
3 — Dispersion des résultats obtenus à partir d'un lot de ciment «homogène»	32
4 — Variabilité des échantillons de ciment prélevés dans un lot «homogène» — Influence sur la dispersion des résultats	35
5 — Essai d'analyse de la cause de la variabilité des ciments anhydres à l'intérieur d'un lot réputé «homogène»	37
6 — Pré-hydratation volontaire du ciment anhydre	38
7 — La dispersion, du laboratoire à l'usine	39
8 — Conclusions	40
CHAPITRE 3 — Premier et second retrait des pâtes de ciment	41
1 — Etude bibliographique des propriétés du premier retrait	42
2 — Quelques observations complémentaires sur le premier retrait	42
3 — Observations préliminaires sur le second retrait	44
CHAPITRE 4 — Déformation de la pâte et hydratation du ciment	46
1 — Second retrait et chaleur d'hydratation	46
2 — Discontinuité observée par M. Del Campo, et second retrait	55
3 — Vers un approfondissement du mécanisme du second retrait et du gonflement	58
4 — Essai de synthèse	63
Annexe au chapitre 4 — Influence de la composition chimique des ciments sur la déformation des pâtes	64

CHAPITRE 5 – Un type de fissuration des revêtements en béton hydraulique non armé : fissuration par hydratation localement différée	70
1 – Joints neutres, joints actifs, fissures, dans un revêtement en béton hydraulique non armé	70
2 – Esquisse d'un programme de constatations	71
3 – Aspects méthodiques des constatations	75
4 – Constatations	76
5 – Fissuration des revêtements en béton hydraulique par hydratation localement différée	82
CHAPITRE 6 – Choix des ciments pour diminuer le risque de fissuration par hydratation localement différée	84
1 – L'analyse classique du lien entre retrait et fissuration et son incapacité à rendre compte de la fissuration H.L.D.	84
2 – Approfondissement du mécanisme de fissuration H.L.D.	86
3 – L'essai classique de fissurabilité à l'anneau	89
4 – Indice de nervosité du ciment	91
Conclusions	94
1 – Aspect systématique du mécanisme de fissuration : le retrait du gel	95
2 – Aspect accidentel du mécanisme de fissuration : hydratation localement différée	95
3 – Retrait et fissuration	96
Bibliographie	99



AVANT-PROPOS

Cette recherche a été faite au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui, depuis sept ans, est mon école.

Je tiens à exprimer ma gratitude à M. Pasquet pour son exigence de rigueur, à M. Parey pour son goût du concret et à mes camarades chimistes, électroniciens, mathématiciens, mécaniciens, mes maîtres, dans leur spécialité.

Je tiens à assurer de ma respectueuse reconnaissance :

- M. le Professeur Siestrunk qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse ;
- M. Peltier, Directeur du C.E.R.I.L.H., ancien Directeur du L.C.P.C., qui m'a orienté puis encouragé ;
- M. Vichnievsky, qui m'a proposé un sujet complémentaire intéressant.

Je remercie M. Lesage, confident attentif des hypothèses en formation, et MM. Brami, Gobert et Gonzalez qui, successivement, mirent tous leurs soins dans l'expérimentation.

INTRODUCTION

Les revêtements routiers en béton hydraulique non armé sont des ouvrages audacieux car le béton, matériau fragile, peut y être sollicité en traction. Depuis 1962, en France, leur conception est orientée par des impératifs d'économie et de confort de l'utilisateur qui priment l'exigence ancienne des résistances mécaniques maximales. Cependant leur durabilité est assurée, en principe, s'ils sont divisés par des joints en parties suffisamment courtes (dalles).

Lorsqu'en 1963 on constata, sur les nouveaux revêtements, quelques heures, quelques jours au plus, après leur construction, des fissures inattendues, on entreprit une recherche pour diminuer (voire supprimer) ultérieurement ces accidents.

Le sujet de recherche proposé au départ était cependant plus limité. Il s'agissait de mesurer, puis d'étudier les déformations d'éprouvettes de béton sitôt leur malaxage (premier âge), cette expérimentation devant être complétée ensuite par l'étude des capacités de déformation à la rupture. L'hypothèse latente était que la fissuration se produisait lorsque la déformation "potentielle" devenait supérieure à la capacité de déformation à la rupture.

La mise au point d'un dispositif de mesure de la déformation des éprouvettes prit deux ans ; et une année supplémentaire fut consacrée à l'étude des causes de dispersion d'origine non expérimentale. Les résultats expérimentaux acquis au cours de ces trois années montrèrent essentiellement que :

- la courbe de déformation des éprouvettes de pâte de ciment présentait un maximum et un minimum et que, par conséquent, il fallait un assez grand nombre de paramètres pour la représenter ;
- la dispersion de la valeur de ces paramètres n'était pas uniquement due à des causes expérimentales mais également à la variabilité du ciment anhydre.

Lorsque ces premières conclusions purent être tirées, elles parurent accroître sensiblement les difficultés à surmonter pour relier les phénomènes mesurés en laboratoires à ceux conduisant, sur chantier, aux fissures constatées. Fort heureusement, à la même époque, il fut possible d'observer les conditions de fissuration de nouveaux revêtements ; le rapprochement entre les observations de chantier et les résultats des mesures de laboratoire, permit la démarche plus empirique exposée ci-dessous.

Puisque l'objectif est de diminuer les risques d'un certain type de fissuration, l'étude en laboratoire des déformations des bétons, mortiers et pâtes de ciment au premier âge, n'est qu'un moyen. Le principal lien entre ces essais et le problème posé est, au départ, la période de l'observation, correspondant à celle où se produit la fissuration (Chapitre 1).

La première information apportée par l'étude est celle de la dispersion des résultats ; information directrice lorsqu'elle est confrontée aux premières constatations faites sur chantier : si le nombre des fissures qui endommagent un revêtement dépend du ciment choisi, la différence la plus nette entre les ciments est celle de la vitesse de déformation de leur pâte normale (et non des déformations elles-mêmes) à un certain stade de leur évolution (Chapitre 2).

En 1966, des constatations systématiques sur des revêtements en construction montrèrent que, parmi les fissures apparues, la plupart endommageaient des zones où, à la suite d'irrégularités de fabrication, deux volumes de béton étaient juxtaposés sans que l'hydratation de leur ciment soit simultanée (Chapitre 5). L'effet de cette juxtaposition est de transformer une vitesse en un gradient de déformation dans l'espace. Elle permet donc de concevoir comment la vitesse de déformation peut influencer sur la fissuration et donc comment les constatations faites sur chantiers et les résultats expérimentaux peuvent s'inscrire dans un ensemble cohérent. C'est pourquoi, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a conseillé à partir de 1967, de choisir les ciments pour revêtements auto-routiers parmi ceux dont la pâte normale a une faible vitesse de retrait après prise. Cette mesure associée à un contrôle plus serré de la régularité de la fabrication et de la répartition du produit de cure a donné, jusqu'à présent, le résultat escompté. Sur aucun des revêtements construits depuis (environ 200 km) on n'a observé une fissuration anormale.

Ce succès apparent n'est pas une garantie complète d'efficacité pour les chantiers futurs. La preuve de la validité de ce critère de choix des ciments doit être établie surtout par une meilleure compréhension du mécanisme de la fissuration.

Puisque l'hydratation localement différée semble être à l'origine des fissures étudiées, il importait de faire la part des déformations de la pâte dues à l'hydratation, à l'exclusion de celles dues au départ de l'eau ou aux variations de température (Chapitre 3 et 4).

Enfin, ce sont les vitesses de déformation des pâtes et non des bétons qui distinguent nettement les ciments. Il est donc nécessaire de se représenter comment une particularité de la déformation de la pâte qui n'influence pas la déformation du béton libre, détermine par contre la fissuration du revêtement (Chapitre 6).

L'étude débouche donc sur deux domaines très différents mais qui l'un et l'autre sont objets de nombreuses recherches actuellement en cours : le premier se rapporte à la physico-chimie de l'hydratation du ciment, le second au rôle des micro-fissures dans le comportement mécanique du béton. Il n'était ni dans ses objectifs initiaux, ni dans ses possibilités, de traiter fondamentalement ces deux questions.

CHAPITRE 1

MESURE DE LA VARIATION DE LONGUEUR D'UNE EPROUVETTE DE BETON, MORTIER OU PATE DE CIMENT, AU PREMIER AGE

La principale difficulté consiste à commencer la mesure de la variation de longueur de l'éprouvette lorsque le matériau est susceptible de se déformer même sous l'action d'une force très faible.

Pour cela, il est nécessaire :

- que l'éprouvette soit moulée,
- que le système de mesure n'oppose aucune résistance au déplacement.

Les dispositifs pré-existants utilisés par plusieurs expérimentateurs permettent de suivre avec des lunettes de grossissement moyen le mouvement de repères ancrés sur la face supérieure (non moulée) de l'éprouvette [1] [2] *

Le dispositif utilisé pour cette étude se différencie des précédents du fait que la variation de longueur de l'éprouvette n'est pas mesurée sur sa face supérieure exposée mais au niveau de son axe longitudinal de symétrie.

Cette différence est importante pour deux raisons :

- dans une éprouvette de béton, de mortier ou de pâte de ciment, la composition de la couche superficielle est toujours, par rapport à la composition moyenne, surdosée en eau et en éléments fins ;
- dans la couche superficielle de la face exposée, l'équilibre des températures et des tensions de vapeur est plus vite atteint qu'au centre de l'éprouvette.

1 - DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

L'essai consiste à suivre les mouvements de deux plots situés aux deux extrémités d'un moule et solidaires de la pâte de ciment, du mortier ou du béton étudiés. Sur la queue du plot, extérieure au moule, est vissée la tige d'un capteur électromagnétique. A tout déplacement du plot correspond une intensité de courant électrique susceptible d'être enregistrée.

* Les chiffres entre crochets renvoient aux références bibliographiques en fin de texte.

1.1 - Le moule (Fig. 1)

Les dimensions usuelles du moule sont 7 x 7 x 28 cm. Il est réalisé en tôle d'acier de 10 mm d'épaisseur.

Les deux plaques d'extrémité de ce moule sont percées en leur centre d'un trou de 8 mm de diamètre par lequel passera la queue du plot, le montage une fois terminé. Chaque moule est repéré par un numéro.

1.2 - Le plot (Fig. 2)

Ce plot est destiné à suivre les mouvements de la pâte de ciment et du mortier étudiés ; il est en duralumin et de ce fait, son poids n'est que de 5 ou 7 grammes suivant que sa forme comporte 2 ou 3 redans (Cas de la Fig. 2)*

Le duralumin, comme l'aluminium, réagit vivement avec la chaux libre du ciment. Si le plot était nu, de l'hydrogène se dégagerait à l'interface du plot et de la pâte et risquerait de perturber l'essai. Pour cette raison les plots utilisés sont préalablement enrobés, soit d'une résine, soit d'une pâte de ciment qu'on laisse durcir - et donc réagir avec le duralumin - avant l'essai. (En fait les plots sont le plus souvent récupérés sur une éprouvette ancienne).

* Le duralumin a un coefficient de dilatation élevé (environ $23 \cdot 10^{-6}$). Lorsque l'éprouvette n'est pas isotherme en tous points, on ne connaît pas la température des plots, et donc la correction à faire, avec précision. Il serait alors préférable d'utiliser des plots en invar. Par contre, lorsque l'éprouvette est isotherme en tous points (voir par. 6), on peut utiliser sans inconvénient les plots en duralumin.

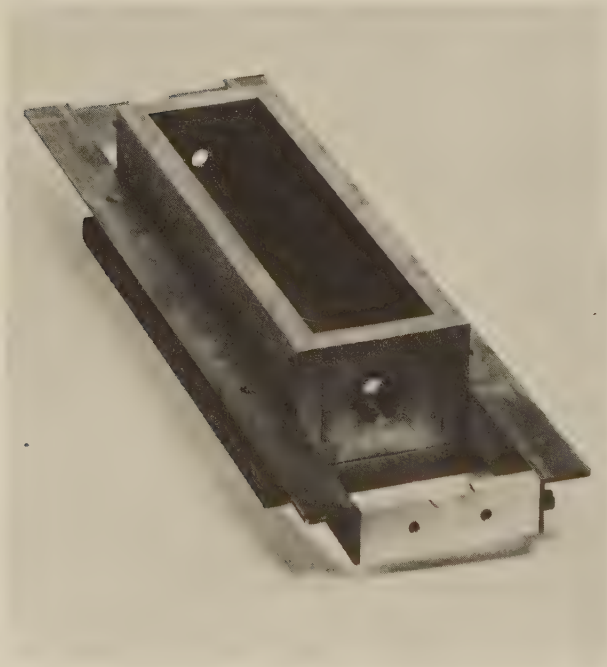


Fig. 1 - Le moule.



Fig. 2 - Le plot.

La queue du plot comporte à son extrémité un trou taraudé susceptible de recevoir la tige du capteur.

1.3 - Dispositif de fixation du plot (Fig. 3)

Ce dispositif de fixation a été étudié avec un soin particulier pour satisfaire à deux conditions : il permet de fixer rigidement le plot au moule, au cours de la mise en place de la pâte de ciment ou du mortier et au moment de la fixation de la tige du capteur. Par la suite, lorsque le montage est terminé, il permet de libérer les plots sans déplacements accidentels de ceux-ci.

Malgré ce dispositif, on ne peut pas éviter qu'au moment de sa libération, le plot ne s'écarte légèrement de la paroi du moule, en raison de l'élasticité du plot et de la paroi. Mais ce mouvement parasite étant instantané ne peut être confondu avec une déformation de la pâte. Il donne au dispositif de mesure une possibilité supplémentaire : celle d'enregistrer les légers gonflements qui se produisent parfois au cours des premières heures suivant le malaxage de la pâte.

1.4 - Les capteurs de déplacement (Fig. 4)*

Ce sont des capteurs à variation d'inductance marque COLLINS type SS 103.

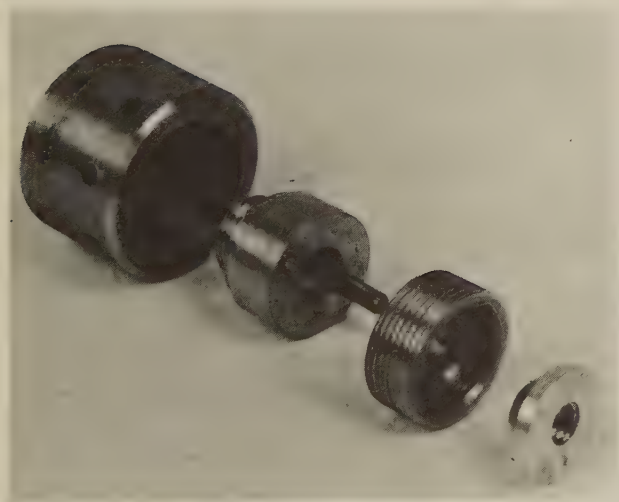


Fig. 3 - Le dispositif de fixation du plot au cours du montage.

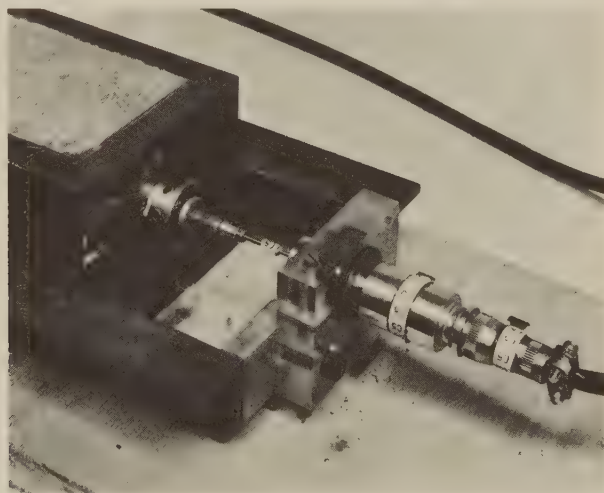


Fig. 4 - Capteur de déplacement fixé sur des supports en invar solidaires du moule

* La chaîne de mesure a été conçue, réalisée et entretenue par la section «Electronique» du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Ces capteurs ont l'avantage de posséder leur propre système d'alimentation en courant alternatif et de détection de la tension de déséquilibre.

Leur tige porte un noyau en fer doux. Ils sont vissés sur la queue du plot de telle sorte que tout mouvement du plot entraîne le mouvement du fer doux à l'intérieur d'un champ magnétique alternatif. Ce mouvement a pour effet de déséquilibrer la tension électrique entre deux bobines d'un circuit secondaire. Les capteurs sont fixés sur un bâti en invar, solidaire du moule.

1.5 - Appareils d'enregistrement (Fig. 5)

Le déséquilibre des deux bobines secondaires est enregistré sur un potentiomètre automatique (méthode d'opposition). Marque MECI type 62 356.

1.6 - Dispositif de pesée des moules (Fig 5)

La perte en poids de chaque éprouvette, due à l'évaporation d'une partie de l'eau interne, est enregistrée. Un dispositif spécial, dit "de pesée séquentielle",* permet de suivre les pertes en poids de 4 éprouvettes en utilisant une seule balance enregistreuse.

Pour cela, chaque moule est posé sur le plateau de la balance un quart d'heure toutes les heures, les trois autres moules étant alors relevés.

1.7 - Salle d'essai (Fig. 5)

L'ensemble de ce dispositif est placé dans une salle de conservation dont l'atmosphère est régulée en température et hygrométrie. La température est de $20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ et l'hygrométrie relative de $50 \% \pm 3 \%$.

* Ce dispositif, imaginé pour ces essais, a été réalisé par la Section «Matériel» du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Il a fait l'objet du brevet n° 1 559 813 du 3.2.69 «Dispositif de pesée d'un ensemble de corps distincts».

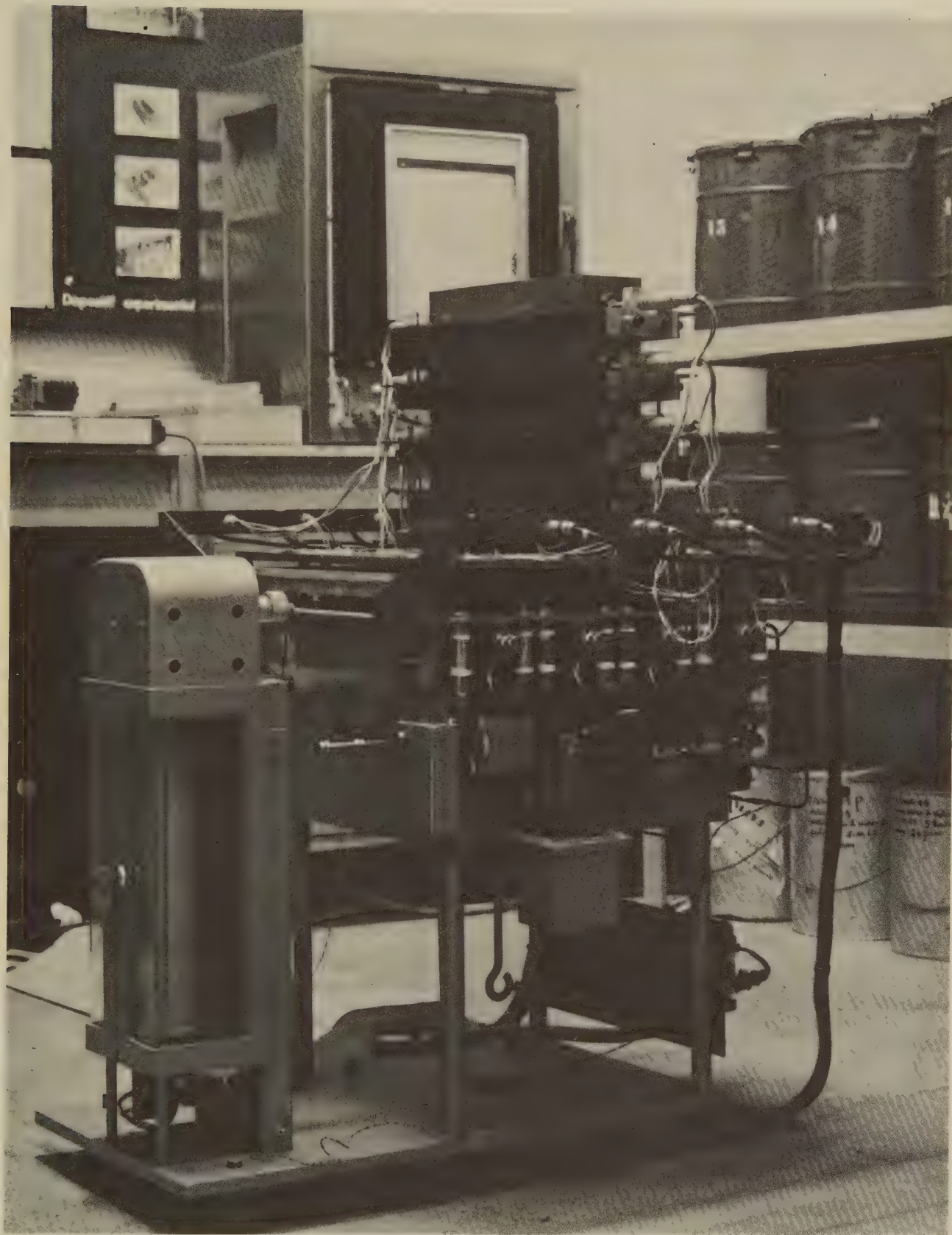


Fig. 5 - Vue d'ensemble de la salle d'essai — Appareil d'enregistrement.

2 - PROCESSUS OPERATOIRE GENERAL*

2.1 - Nettoyage du moule

Après démoulage, le moule est poli au papier de verre fin, pour éliminer les points de rouille, puis avec un disque de polissage en nylon et frotté avec un chiffon sec. Chaque face interne est enduite d'huile de vaseline puis de téflon par pulvérisation.

Ces précautions sont nécessaires pour obtenir des états de surface comparables entre chaque moule et, pour un même moule, d'une journée à l'autre.

2.2 - Fabrication de la pâte de ciment ou du mortier

Le malaxeur est d'un principe analogue à celui normalisé pour les mortiers (NF P 15 411) ; sa capacité utile est de 20 litres.

Le temps de malaxage se décompose en une minute, à vitesse lente, et, deux minutes, à vitesse rapide.

L'eau entrant dans la composition de la pâte est à une température de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ excepté le cas des essais isothermes pour lequel les constituants étaient préalablement refroidis*.

Lorsque les expériences sont effectuées sur quatre moules, la pâte (ou le mortier) est gâchée en une seule fois.

2.3 - Préparation du moule

Sur chaque moule remonté, les plots sont solidement fixés (Fig. 6). En outre, la position du porte-capteur est réglée dans l'alignement de la queue du plot. Ainsi lorsqu'il faudra placer le capteur, la tige de celui-ci n'exercera aucun effort transversal sur la queue du plot.

2.4 - Mise en place de la pâte

Les quatre moules préparés sont fixés sur le plateau d'une table vibrante, dont les caractéristiques de vibration sont connues. La place des moules sur la table est repérée une fois pour toutes. Les moules sont remplis à la truelle puis vibrés

* Ce processus opératoire est complété par des variantes qui sont indiquées au par. 6 de ce chapitre.

simultanément. Le temps entre la fin de malaxage et le début de la vibration est constant (en général 10 minutes).

Le temps de vibration est de 1 minute en général (1 minute 30 pour les essais isothermes). La vibration terminée, la surface des éprouvettes n'est pas lissée mais seulement arasée (sauf pour les éprouvettes isothermes).

2.5 - Mise en place des capteurs et d'une sonde de température

La sonde de température est entourée d'une gaine huilée et enfoncée dans la pâte.

La mise en place des capteurs, et notamment le vissage de leur tige sur la queue du moule, est facilitée par les opérations qui ont été décrites lors de la préparation du moule.

Lorsque toutes les tiges des capteurs sont vissées, on libère les plots de mesure.

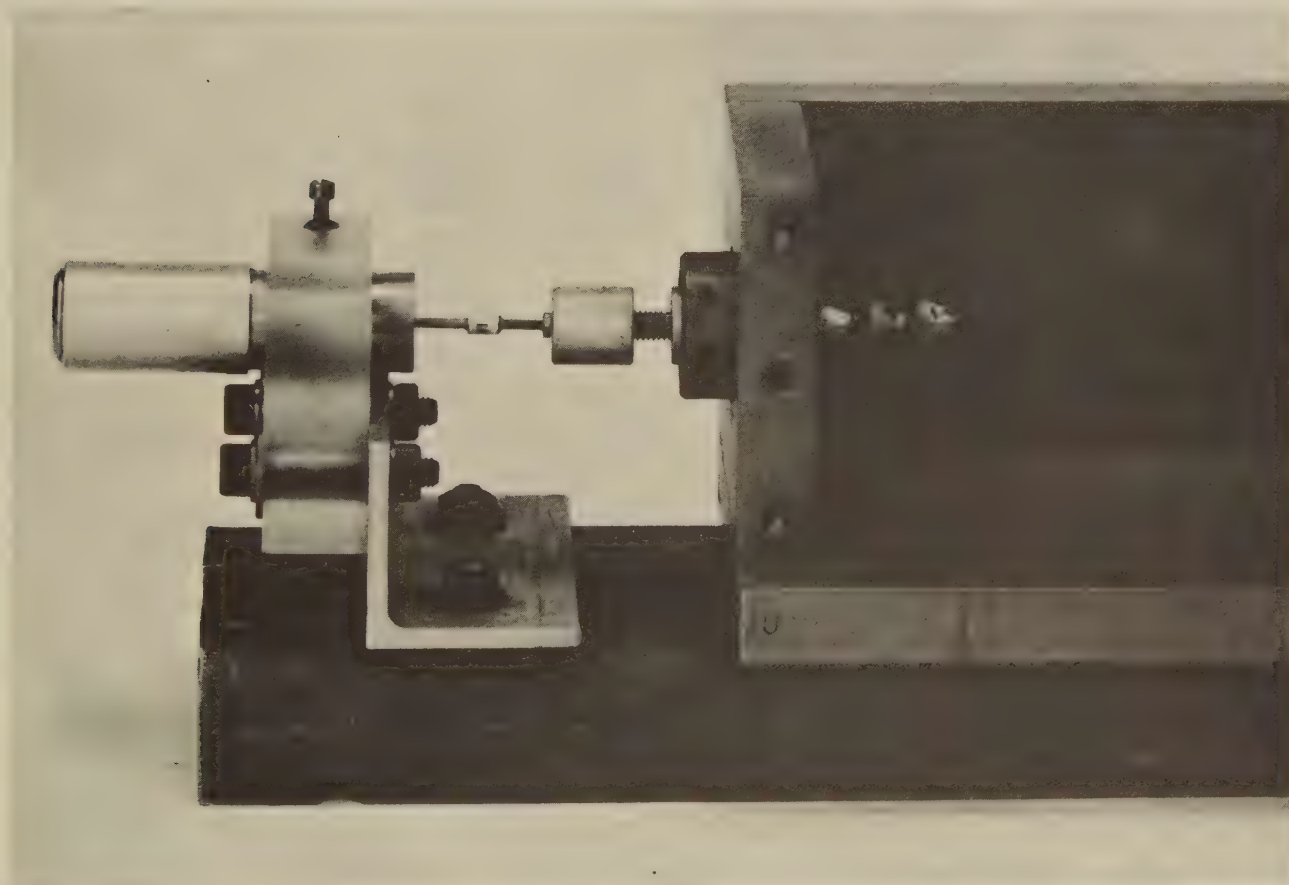


Fig. 6 - Vue du moule vide montrant les plots et les capteurs montés pour l'essai.

3 - CARACTERISTIQUES D'EMPLOI DU DISPOSITIF DE MESURE

3.1 - Justesse

La grandeur que l'on souhaite mesurer est le déplacement d'une extrêmité de l'éprouvette. La somme algébrique du déplacement des deux extrémités donne la variation de longueur de l'éprouvette provoquée par la déformation du matériau.

La chaîne de mesure, depuis le capteur jusqu'à l'enregistreur est étalonnée par référence à une vis micrométrique dont les déplacements sont connus à 2 microns près. L'erreur de justesse de l'étalonnage est d'environ 1 % de la mesure. Il a été vérifié que la "dérive de zéro" était pratiquement nulle.

La tige du capteur étant vissée sur la queue du plot, les déplacements de ces deux éléments sont identiques. L'adhérence entre le plot et le matériau peut être vérifiée à postériori (Fig. 7).

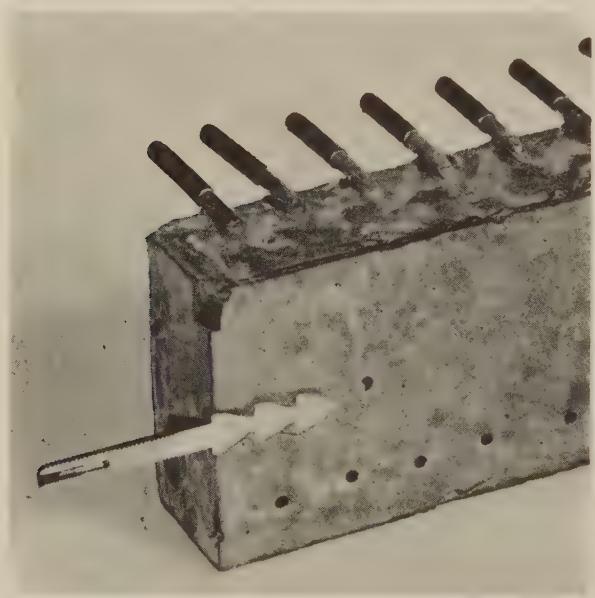


Fig. 7 - Coupe d'une éprouvette montrant l'enrobage du plot par la pâte de ciment.

Lorsque le matériau est encore "mou", il peut se déformer sans entraîner le plot lorsque ce dernier présente une résistance, même faible, au déplacement. Pour cette raison, il est important que la queue du plot et la tige du capteur portant le noyau de fer doux soient bien centrées par rapport au corps du capteur. Le mode opératoire prévoit la réalisation de ce centrage (Cf. § 2.3). S'il subsiste accidentellement un accrochage, les courbes enregistrées sont "en marche d'escalier" et doivent être éliminées.

3.2 - Sensibilité et précision

Suivant l'échelle utilisée, la portée maximum du graphique (250 mm) représente 250, 500, 1000 ou 2000 microns. La précision de la chaîne de mesure peut se décomposer ainsi :

erreur de justesse de l'étalonnage	1 %
erreur de linéarité de l'étalonnage	0,2 %
inter-influence des capteurs (polyphonie)	1 %
influence des grandeurs étrangères (variation de la température ou de la tension d'alimentation)	0,2 %
Précision relative de la mesure	2,4 %

3.3 - Fidélité de l'essai

Lorsque deux expériences sont effectuées dans des conditions identiques, les variations de longueurs enregistrées des deux éprouvettes sont pratiquement identiques comme le montre la Fig. 8.

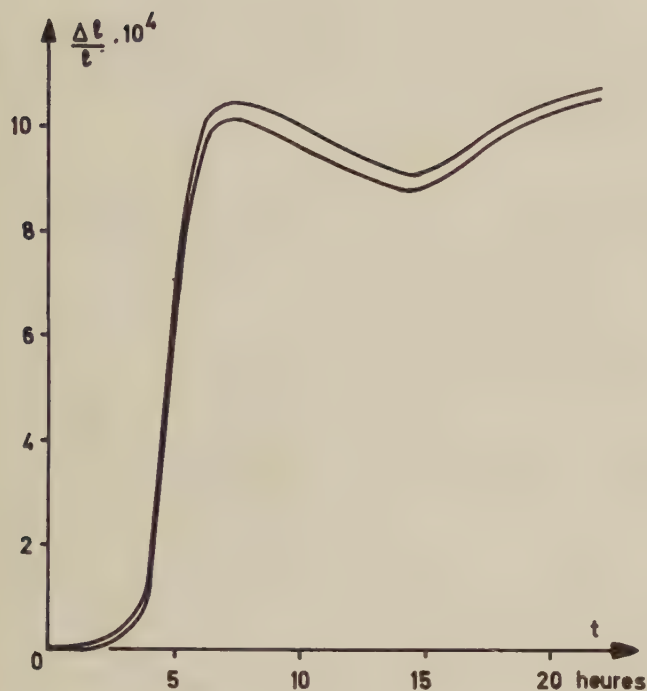


Fig. 8 - Reproductibilité des résultats

Les deux courbes ont été obtenues sur deux éprouvettes de pâte de ciment fabriquées et essayées en même temps.

Dans ces conditions on peut considérer que la mesure de la variation de longueur d'une éprouvette de béton mortier ou pâte de ciment est fidèle. Cependant, les conditions d'identité des expériences sont restrictives et s'énoncent ainsi :

- identité de composition du matériau essayé :
- . identité des proportions,
- . identité des composants : cette condition suppose, en particulier, pour le ciment, non seulement la même composition d'origine mais le même mode et la même durée de conservation,
- identité de fabrication :
- . identité des moules (dimension, état de surface, nettoyage),
- . même temps de malaxage, de vibration, dans des conditions identiques,
- . même intervalle de temps entre la fin du malaxage et le début de la vibration.

4 - VARIATION DE LONGUEUR DE L'ÉPROUVETTE ET DÉFORMATION DU MATÉRIAU (BÉTON, MORTIER OU PÂTE DE CIMENT).

Nous désignons par "variation de longueur de l'éprouvette" la grandeur enregistrée par le dispositif expérimental et par "déformation du matériau" une grandeur susceptible d'intervenir dans une équation d'état (au sens de la thermodynamique).

Pour déterminer expérimentalement une telle grandeur, il est nécessaire de pouvoir définir les conditions expérimentales au niveau d'un volume élémentaire du matériau, ce qui est difficile avec le dispositif expérimental décrit plus haut.

Lorsque l'éprouvette est en béton, mortier ou pâte de ciment, elle peut être, au cours du premier âge, traversée par trois flux :

- un flux de chaleur, vers les faces de l'éprouvette ;
- un flux d'eau à l'état liquide. Ce flux, dirigé verticalement vers le haut se manifeste au cours des deux ou trois premières heures. Il correspond à la sédimentation des composants solides du matériau. C'est le phénomène du ressuage ;
- un flux d'eau à l'état de vapeur, lorsque la face supérieure de l'éprouvette est exposée.

En outre, l'éprouvette est soumise à un système de forces mécaniques intérieures ou extérieures, propre au dispositif expérimental :

- les forces extérieures proviennent du frottement de l'éprouvette sur le fond du moule ;
- les forces intérieures résultent de la cohésion du matériau. Les valeurs des paramètres caractérisant cette cohésion varient avec le temps pendant la durée de l'essai.

Ces difficultés peuvent être en partie surmontées en réalisant des variantes du processus opératoire pour modifier (et parfois supprimer) ces flux et gradients. Avant d'exposer ces variantes, il est utile d'analyser l'incidence inévitable du frottement de l'éprouvette sur le fond de son moule.

5 - INFLUENCE DU FROTTEMENT SUR LA VARIATION DE LONGUEUR DE L'ÉPROUVETTE

5.1 - Valeur du coefficient de frottement

Lorsque le mode opératoire de l'essai a été mis au point, plusieurs procédés ont été essayés pour diminuer le frottement de l'éprouvette sur le fond du moule. Citons parmi ceux-ci :

- l'interposition entre l'éprouvette et le moule d'une feuille de plastique et d'une couche de bisulfure de molybdène (cet ensemble a été même parfois doublé) ;
- une nappe de mercure dans le fond du moule et sur laquelle flotte l'éprouvette.

Ce dernier procédé est coûteux, sa réalisation est délicate. Par ailleurs aucun autre n'apporta une amélioration décisive. C'est pourquoi le dispositif d'essai et le processus opératoire retenus ne visent pas à supprimer le frottement mais seulement à le rendre uniforme et régulier.

Le coefficient de frottement sur le fond du moule d'une éprouvette de mortier venant d'être coulée (faces latérales décoffrées) est supérieur à l'unité, de l'ordre de 1,3. Ce fait peut sembler paradoxal. Cependant, si on retourne la plaque de fond sur laquelle est située l'éprouvette celle-ci ne tombe pas immédiatement. On peut proposer, de ce phénomène, l'explication suivante : au moment de la mise en place la vibration énergique chasse l'air du moule. La pression atmosphérique ne s'exerce plus sur la base de l'éprouvette moulée sur la plaque de fond. Le coefficient de frottement est supérieur à 1 parce que les forces de frottement sont rapportées au seul poids de l'éprouvette. Dans le calcul du véritable coefficient, l'effort de la pression atmosphérique doit être ajouté au poids de l'éprouvette : la valeur réelle du coefficient de frottement est donc de l'ordre de :

$$1,3 \times \frac{7 \times 2,3}{1000 + 7 \times 2,3} \neq 2 \cdot 10^{-2}$$

Cette valeur très faible montre avec quel soin les parois des moules ont été nettoyées. Cependant, pour les essais, tout se passe comme si le coefficient de frottement était supérieur à l'unité.

5.2 - Etude théorique de l'influence du frottement

L'étude du frottement fait partie de la recherche générale pour libérer le résultat de la mesure des conditions de l'expérience.

Une première étape consisterait à déduire de la variation de longueur d'une éprouvette de longueur 2 celle d'une éprouvette de même section mais de longueur quelconque.

Pour obtenir ce résultat, l'existence du frottement est un obstacle. Ce n'est pas le seul : l'existence de gradients thermiques vers les faces extrêmes peut modifier plus ou moins les conditions de l'essai selon la longueur de l'éprouvette. Ces gradients sont en général faibles au début de l'essai ; ils peuvent, si c'est nécessaire, être réduits ou annulés grâce à un dispositif expérimental qui sera décrit ultérieurement (déformation isotherme). Pour l'étude du frottement, nous considérons qu'ils sont négligeables. Désignons :

- par t , le temps ; l'origine des temps coïncide avec la libération des plots ;
- par ℓ , la demi-longueur initiale de l'éprouvette ;
- par $u(t)$, la variation de longueur de cette éprouvette depuis l'origine des temps jusqu'au temps t ;
- par $U(t).\ell$, la variation de longueur de cette même éprouvette qui aurait été enregistrée s'il n'y avait aucun frottement.

Par définition, mais à condition de négliger l'effet du gradient thermique vers les extrémités de l'éprouvette, $U(t)$ est indépendant de ℓ .

Pour qu'il y ait déplacement d'une section transversale de l'éprouvette, il faut que la résultante du champ des contraintes dans cette section soit supérieure à celle des forces de frottement.

Au temps t , le champ des contraintes est le même en toute section de l'éprouvette. Par contre la résultante des forces de frottement, nulle à l'extrémité, augmente linéairement avec la distance entre l'extrémité et la section considérée.

Quel que soit l'instant, il existe toujours, en partant de l'extrémité, une section, située à une distance x , au-delà de laquelle toute section transversale est immobile, et telle que :

$$\frac{1}{2} du = x \cdot dU$$

x est une fonction continue et univoque du temps, nulle lorsque la variation de longueur de l'éprouvette est nulle, sinon, strictement positive, bornée par la valeur ℓ .

La variation de longueur enregistrée de l'éprouvette est, au temps t , fonction de la longueur initiale 2ℓ de l'éprouvette :

$$\frac{1}{2\ell} \cdot u(\ell) = \int_0^t U' \cdot \frac{x}{\ell} dt$$

C'est une fonction décroissante de ℓ et lorsque ℓ tend vers zéro, $\frac{u(\ell)}{2\ell}$ tend vers $U(t)^*$. Cette propriété, valable quelle que soit la nature rhéologique du matériau, peut être utilisée pour déterminer expérimentalement la valeur de $U(t)$.

5.3 - Etude expérimentale de l'influence des frottements

On a mesuré les variations de longueur d'éprouvettes longues de 10, 15, 28 et 100 cm, fabriquées avec une même pâte de ciment.

En répétant une trentaine de fois les essais, on vérifie que la variation relative de longueur, pour un âge donné de la pâte de ciment, augmente linéairement avec la longueur de l'éprouvette. Lorsque l'état de surface est approximativement le même pour tous les fonds de moule, il est possible de déduire expérimentalement la valeur de $U(t)$ (Fig. 9). Cependant, pour cette détermination, des conditions expérimentales satisfaisantes n'ont été obtenues qu'une fois sur trois. Avec une éprouvette de 28 cm, au-delà de la première période de retrait, les variations de longueur sont, en général, libérées du frottement.

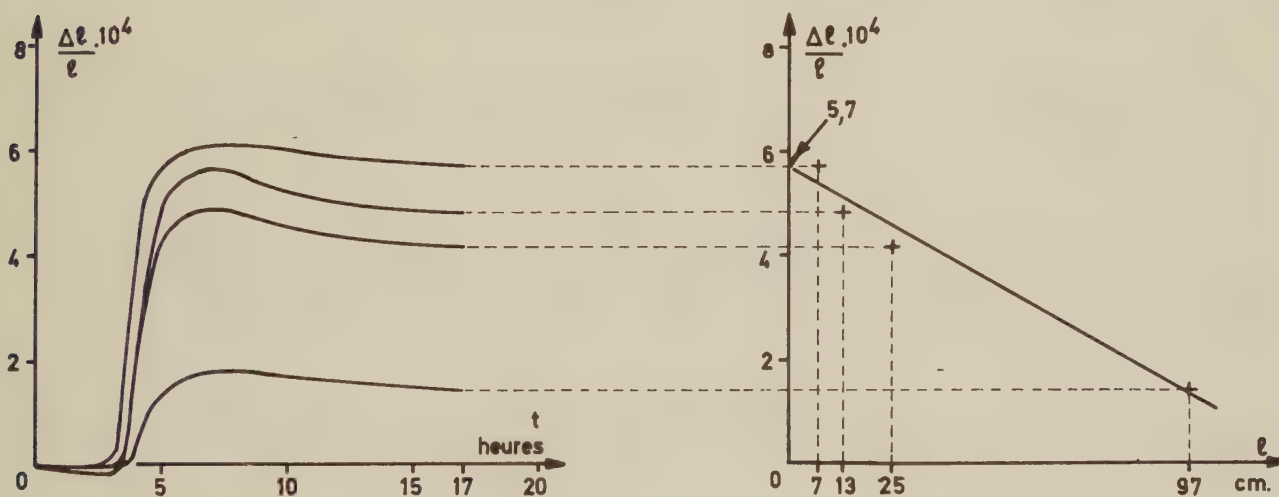


Fig. 9 - Influence du frottement sur les variations de longueur mesurées

A gauche sont représentées les variations relatives de longueur d'éprouvettes, longues de 7, 13, 25 et 97 cm. Plus l'éprouvette est longue, plus la variation relative de longueur est faible. Par extrapolation (à droite) on peut déduire une estimation de la valeur du retrait sans frottement à 17 heures : $5,7 \cdot 10^{-4}$. On constate (à gauche) qu'au delà du premier maximum les courbes sont parallèles et que, par conséquent, le frottement n'intervient plus.

* Ce résultat est intuitif : moins l'éprouvette est longue, moins le frottement intervient sur la valeur mesurée. A la limite, pour une éprouvette de longueur nulle, le frottement évidemment n'interviendrait plus.

Dans la suite de l'étude les variations de longueur seront toujours rapportées à la base de mesure sur une éprouvette de 28 cm, soit 25 cm. (La réduction de 3 cm tient compte de la dimension des plots). Cette variation relative sera désignée par $\frac{\Delta l}{l}$.

Au cours des toutes premières heures, $\frac{\Delta l}{l}$ est une estimation par défaut de U. Ensuite :

$$\frac{d}{dt} \frac{\Delta l}{l} = \frac{dU}{dt}$$

6 - VARIANTES DU PROCESSUS OPERATOIRE ET DEFINITIONS

Ces variantes ont été utilisées soit pour modifier, soit pour supprimer les flux et les gradients qui se manifestent dans l'éprouvette.

L'étude d'éprouvettes semblables, expérimentées suivant ces variantes, doit mettre en évidence les caractéristiques de la variation de longueur qui seraient pratiquement indépendantes de la modification des flux et des gradients. Dans la mesure où ces derniers sont supprimés et que, de ce fait, l'éprouvette peut être considérée comme homogène, sa variation de longueur peut être reliée à la déformation du matériau.

6.1 - Modification ou suppression des flux de l'eau (en phase vapeur ou liquide)

- Eprouvette "exposée" (Fig. 10)

La face supérieure de l'éprouvette, seule face non moulée, est exposée à une atmosphère non saturée en vapeur d'eau (hygrométrie 50 % $\pm$ 3 %, température 20° $\pm$ 1°, atmosphère de la salle d'essai). L'eau interne de l'éprouvette peut s'évaporer.

- Eprouvette "protégée" (Fig. 10)

L'expression sous-entend que l'éprouvette est protégée contre l'évaporation de son eau interne. Une feuille de plastique recouvre la face supérieure de l'éprouvette. Cette feuille est collée au moule par un ruban adhésif et forme une enveloppe étanche.

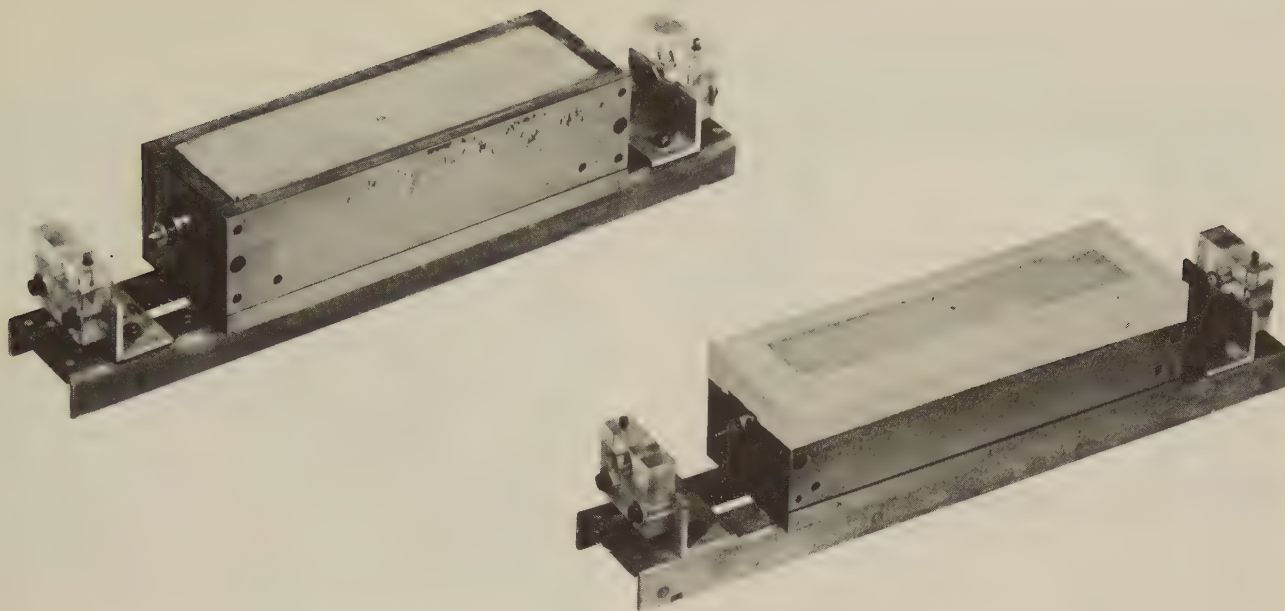


Fig. 10 - Epreuve «exposée» à gauche, «protégée» par une feuille de plastique à droite.
Les deux épreuves sont non calorifugées.

Le flux de vapeur à l'intérieur de l'éprouvette est très fortement diminué par rapport à celui de la variante précédente. Il n'est cependant pas rigoureusement supprimé : lorsque l'éprouvette s'échauffe pendant l'essai, la feuille de plastique est une paroi froide sur laquelle quelques gouttelettes d'eau peuvent se condenser.

- Epreuve "immergée"

La face supérieure de l'éprouvette est recouverte d'une couche d'eau de 3 mm d'épaisseur environ. Pour contenir cette eau sans modifier le moule, l'éprouvette est surfacée 5 mm au-dessous du niveau supérieur du moule.

6.2 - Modification ou suppression du flux de chaleur

- Epreuve "non-calorifugée" (Fig. 10)

Entre les faces de l'éprouvette et l'atmosphère ambiante il n'y a que les parois d'acier du moule et pour la face supérieure non moulée, rien ou la feuille de plastique déjà mentionnée.

- Epreuve "calorifugée" (Fig. 11)

L'éprouvette moulée est placée dans une enceinte faite de bois et de polystyrène expansé. Cette enceinte est entièrement fermée, à l'exception des trous ménagés pour la sortie des queues de plots et des fils de la sonde de température.

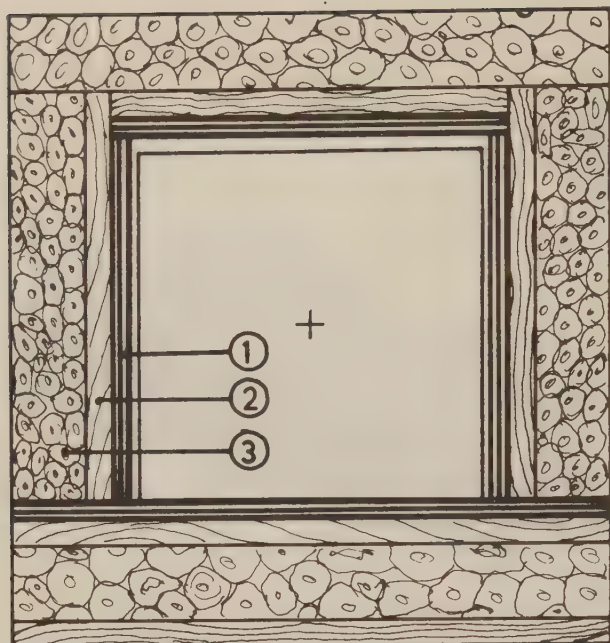


Fig. 11 - Coupe d'une éprouvette calorifugée et de son enrobage.

- ① Amiante : épaisseur 4 mm
- ② Contre-plaqué : épaisseur 5 mm
- ③ Polystyrène expansé : épaisseur 18 mm

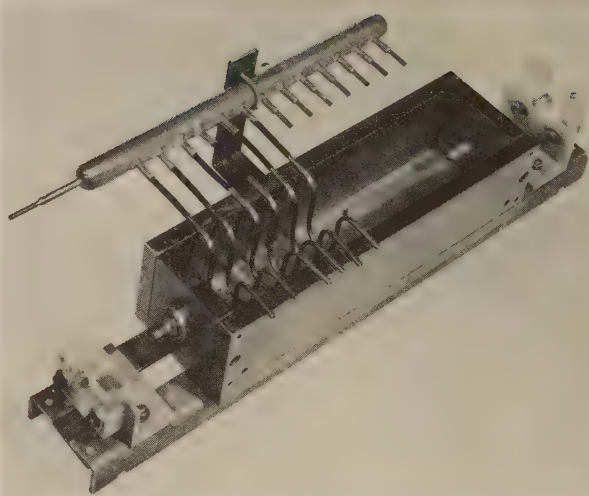


Fig. 12 - Vue de la tubulure de cuivre noyée dans les éprouvettes «isothermes»

La calorifugation permet, d'une part, d'augmenter globalement la température interne de l'éprouvette, d'autre part, de diminuer le gradient thermique de l'intérieur vers les faces.

Des conditions véritablement adiabatiques n'ont pu être atteintes car il aurait fallu pour cela placer les capteurs à l'intérieur de l'enceinte calorifugée. Ces capteurs ne supportent pas une température supérieure à 70°C, limite presque toujours dépassée lorsque l'éprouvette est en pâte de ciment.

- Eprouvette "isotherme" (Fig. 12).

En tout point de l'éprouvette et à tout moment de l'essai, la température est comprise entre 19°C et 20°C. Cette régulation est assurée par une circulation de débit manuellement réglable, d'air à 19°C, dans une tubulure de cuivre noyée dans l'éprouvette. Chaque élément de cette tubulure est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. Les éléments sont reliés entre eux par des tuyaux souples. Il a été vérifié que cette disposition ne modifiait pas la variation de longueur mesurée.

Les constituants de la pâte sont préalablement refroidis de façon à compenser les dégagements de chaleur d'hydratation qui se produisent au cours du malaxage et de l'heure qui suit.

Pour protéger contre l'évaporation une éprouvette isotherme, on ne peut pas utiliser la feuille de plastique car elle devrait être percée pour laisser passer les tubes de cuivre et ne serait donc plus étanche. Dans ce cas, la pulvérisation sur la face supérieure de l'éprouvette d'un produit de cure (caoutchouc chloré) est plus efficace.

7 - CONCLUSIONS

Le dispositif expérimental mis au point pour la mesure des variations de longueur des bétons, mortiers et pâtes a été conçu, au départ, pour une recherche technologique. Les dimensions des éprouvettes, par exemple, sont de l'ordre de celles utilisées pour la mesure des résistances mécaniques.

Lorsque, par la suite, l'objet de la recherche a évolué, d'autres appareils auraient permis des déterminations plus précises des caractéristiques physiques. Celui-ci, avec ses nombreuses variantes, a cependant été conservé. Son défaut majeur, l'influence du frottement, n'intervient plus lorsque se produit le principal phénomène que nous avons étudié.

CHAPITRE 2

DISPERSION EXPÉRIMENTALE ET VARIABILITÉ DES PROPRIÉTÉS DU CIMENT ANHYDRE

On a montré précédemment que la mesure de la déformation au premier âge* de la pâte de ciment était fidèle, à condition de comparer les résultats obtenus sur des éprouvettes réalisées simultanément à partir d'une pâte de ciment issue d'une même gâchée. Ces conditions risquent de limiter les possibilités d'une étude expérimentale comparative des facteurs susceptibles d'influencer la valeur du retrait. Il est donc nécessaire d'en faire dès à présent l'examen.

Dans une récente conférence R. Peltier [3] a montré que le coefficient de variation de la résistance à la compression du mortier normal I.S.O. âgé de 28 jours diminue au fur et à mesure des progrès réalisés dans l'industrie cimentière. Il est actuellement de l'ordre de 6 % pour les C.P.A. 400. Lorsque l'âge du mortier diminue, la valeur du coefficient de variation augmente considérablement ; elle est de 12 % environ pour un mortier de 2 jours.

Le mode opératoire de l'essai de compression du mortier normal est, parmi ceux concernant les ciments, l'un des mieux définis et des plus rodés. Il faut donc s'attendre pour les résultats d'autres essais - et, en particulier le retrait au premier âge - à des coefficients de variation supérieurs. En ce qui concerne le retrait, à partir d'un jour, d'éprouvettes de mortier normal (norme A.F.N.O.R. P 15 433), R. Levy [4] tire, des résultats des essais inter-laboratoires organisés par le Centre d'Etudes et Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques (C.E.R.I.L.H.), un coefficient de variation de 16 % pour le retrait à 28 jours et de 28 % pour l'augmentation du retrait entre un et deux jours. Selon cet auteur l'ordre de grandeur des coefficients de variation des résultats d'essais faits par un même opérateur est d'environ la moitié de ceux indiquées ci-dessus. Le retrait au premier âge de la pâte de ciment doit donc présenter une dispersion au moins aussi grande.

Quels que soient l'essai ou la caractéristique mesurée, les causes de dispersion peuvent être de deux ordres :

- maîtrise insuffisante de certains paramètres du processus opératoire,
- variabilité du matériau soumis à l'essai.

* On appelle âge de la pâte de ciment, la durée écoulée depuis le malaxage (exactement depuis l'introduction de l'eau).

Les paramètres du processus opératoire de l'essai de premier retrait ne sont pas tous complètement contrôlés. Par exemple, malgré les soins apportés au nettoyage des moules, le frottement entre l'éprouvette et le fond du moule n'est peut être pas toujours uniforme. Cependant, lorsque quatre éprouvettes sont mises en place simultanément, à partir d'un mélange ciment-eau malaxé en une seule fois, la dispersion des quatre résultats est, en général, faible. En fait, lorsque les essais sont répétés à différentes époques, à partir du ciment d'un même lot, il semble que l'évolution des résultats ne soit pas uniquement le fait du hasard. Dans ces conditions, il convient d'étudier s'il est possible de réaliser un lot de ciment anhydre dont les propriétés soient identiques en toute partie et n'évoluent pas avec le temps.

1 - INFLUENCE DE L'ÂGE DU CIMENT ANHYDRE SUR LA DEFORMATION AU PREMIER ÂGE DE LA PÂTE DE CIMENT.

On appelle âge du ciment anhydre la durée écoulée depuis la sortie des broyeurs.

Les figures 13 à 22 montrent les différentes courbes de retrait obtenues à partir d'un ciment d'origine unique approvisionné en une seule fois. Sur une même figure, les expériences diffèrent par l'âge du ciment anhydre.

L'âge du ciment anhydre n'a un sens que si le mode de conservation de ce ciment est précisé :

- Conservation du C.P.A.

Ce ciment a été prélevé par nos soins, (en fûts étanches de 50 litres) directement à l'usine. Chaque fût permet environ une semaine d'expériences à raison de deux éprouvettes (7 x 7 x 28 cm) journalières. Après chaque prise, le fût entamé est immédiatement refermé. Par nécessité, les fûts sont stockés dans une atmosphère relativement chaude et humide à teneur en gaz carbonique assez forte.

- Conservation des autres ciments

Jusqu'à l'arrivée au laboratoire, en sacs de 50 kg, l'âge et la conservation de ces ciments sont inconnus. Les sacs sont stockés à côté de fûts, dans la même atmosphère. Après chaque prélèvement le sac entamé est refermé avec du "scotch" et gainé d'une feuille de plastique.

La figure 23 présente, pour chaque ciment, la courbe montrant l'influence de l'âge de ce ciment anhydre sur la déformation de la pâte, mesurée 14 heures après la fin de la mise en place.

A l'exception de la courbe obtenue avec le C.P.A. qui correspond à un assez grand nombre d'expériences faites dans des conditions bien définies (figure 24), les différentes autres courbes ne peuvent être qu'indicatives car elles sont tracées avec très peu de points et, de plus, à une translation près (parallèlement aux

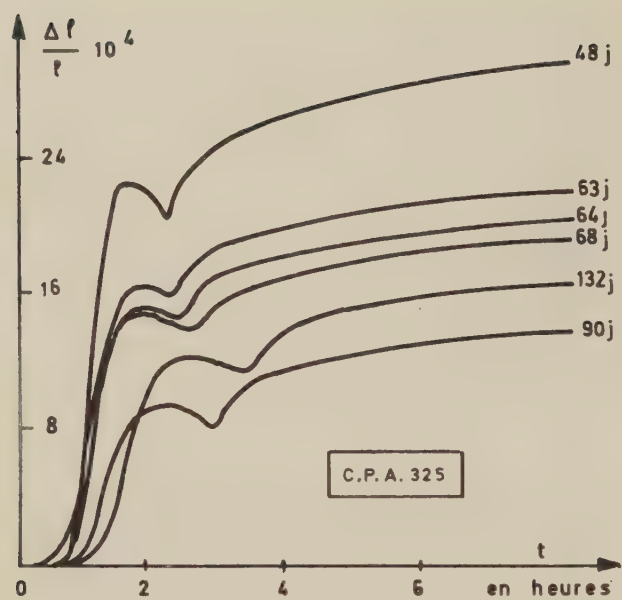


Fig. 13

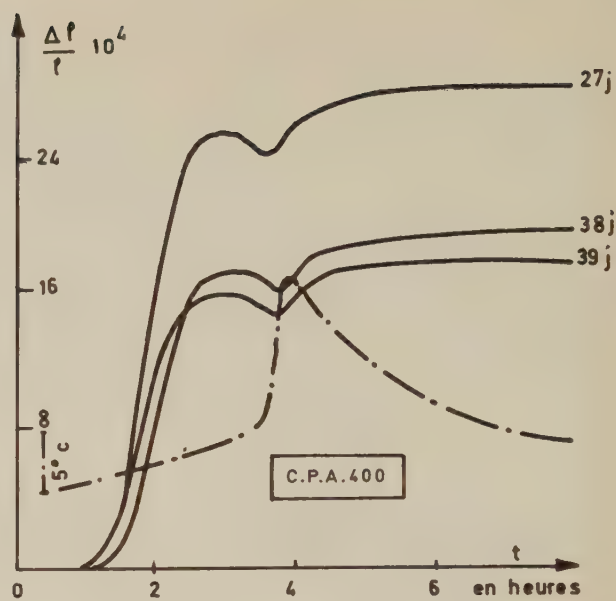


Fig. 14

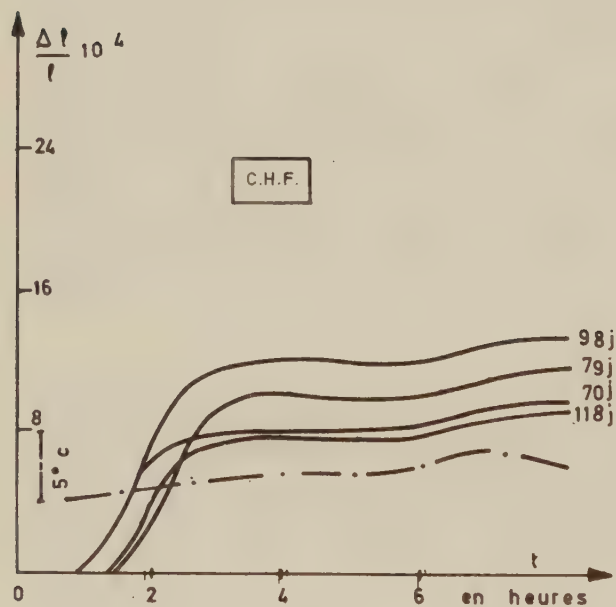


Fig. 15

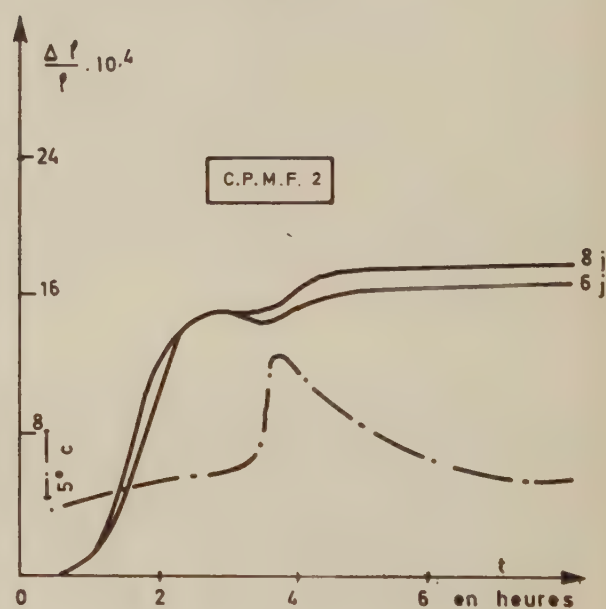


Fig. 16

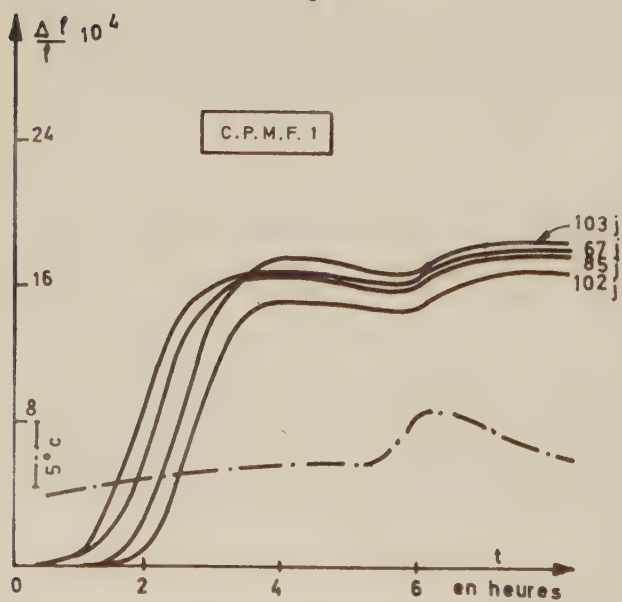


Fig. 17

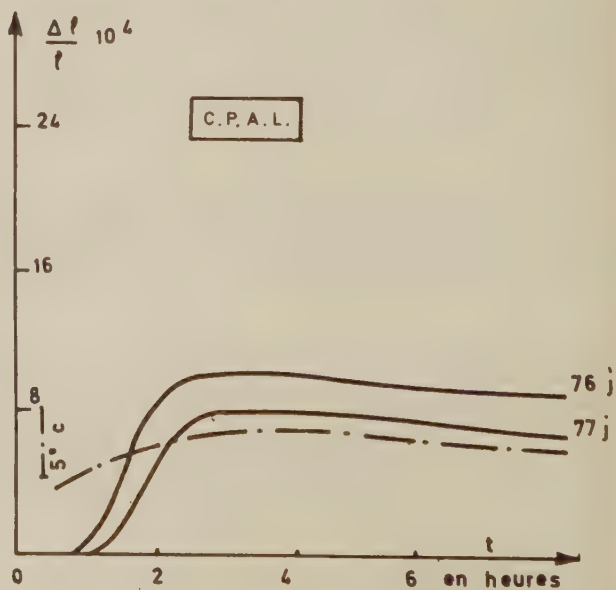


Fig. 18

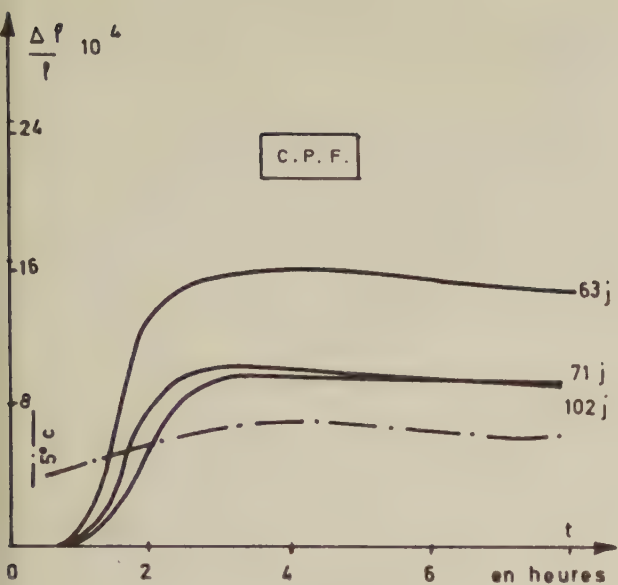


Fig. 19

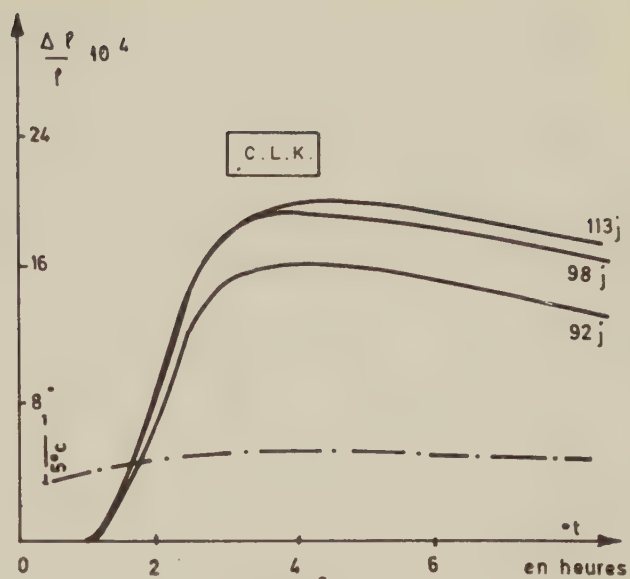


Fig. 20

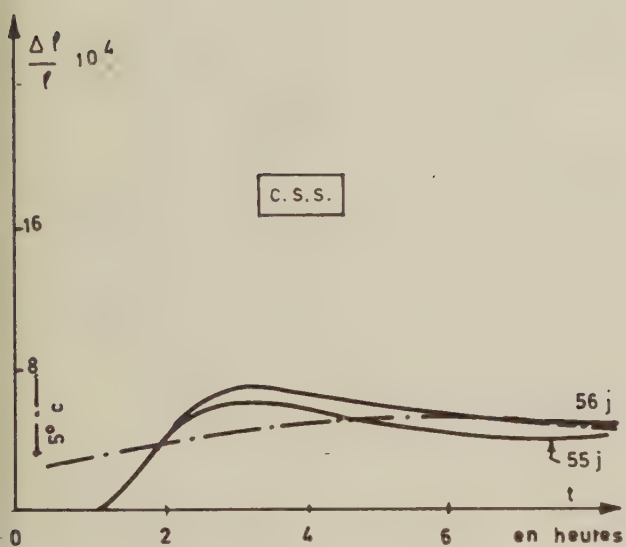


Fig. 21

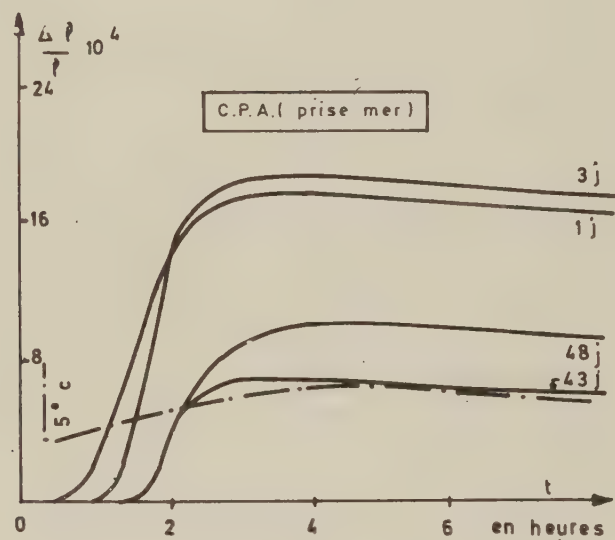


Fig. 22

Fig. 13 à 22 - Influence de l'âge du ciment anhydre sur la déformation, au premier âge, de la pâte du ciment.

Le nombre à l'extrémité de chaque courbe indique la durée de conservation (en jours) du ciment anhydre en laboratoire. Chaque figure correspond à un lot de ciment approvisionné en une seule fois. Les courbes en traits d'axe représentent l'évolution de la température interne de l'éprouvette.

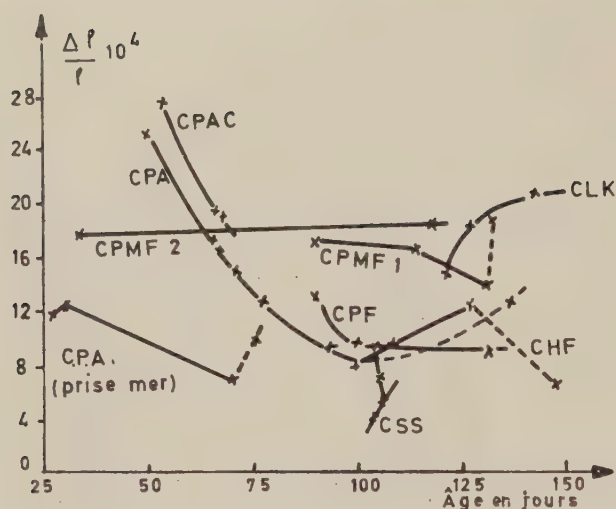


Fig. 23 - Influence de l'âge du ciment anhydre sur la valeur de la déformation d'une pâte de ciment de 14 heures.

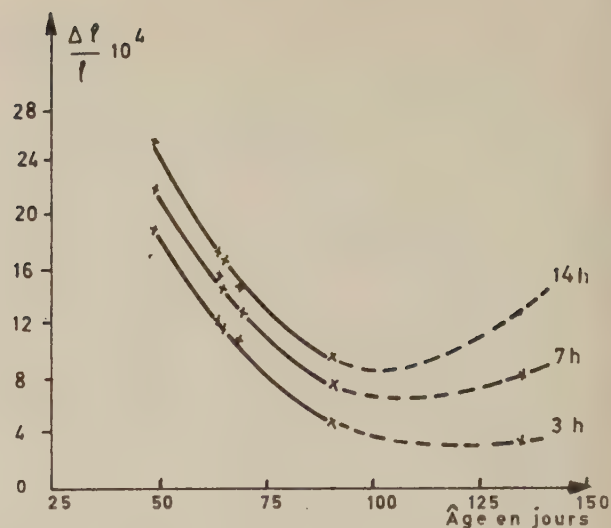


Fig. 24 - Influence de l'âge du ciment anhydre sur la valeur de la déformation d'une pâte de ciment C.P.A. à 3 heures, 7 heures, 14 heures.

abscisses) correspondant à l'âge (inconnu) du ciment au moment de la réception au laboratoire.

Dans le cas du C.P.A., l'évolution de la valeur du retrait de la pâte de ciment est très nette. Lorsque l'âge du ciment anhydre augmente, cette valeur diminue. La valeur du retrait, 14 heures après la fin du malaxage, est divisée par 3 lorsque le ciment anhydre vieillit de 48 jours à 90 jours. Pour le ciment anhydre âgé de 132 jours, le retrait à 14 heures semble être à nouveau plus élevé mais le retrait à 3h30 a encore diminué par rapport à la valeur obtenue avec un ciment âgé de 90 jours (figure 24).

A l'inverse du C.P.A. il semble que le retrait de la pâte de C.L.K., ciment contenant 80 % de laitier, augmente avec le temps de conservation du ciment anhydre.

L'effet de vieillissement a déjà été mis en évidence, mais surtout lorsque le ciment est volontairement éventé. M. Venuat [5] souligne, par exemple, que "les chaleurs dégagées (par l'hydratation) sont d'autant plus faibles que le ciment est plus éventé et que les mesures sont effectuées aux tous premiers âges". Selon cet auteur, pour la plupart des essais, les effets du vieillissement sont, par contre, négligeables lorsque le ciment anhydre est conservé en fût étanche.

Nous allons montrer qu'il n'en est pas ainsi dans le cas de la déformation au premier âge, du moins lorsque les fûts étanches sont de qualité courante.

2 - ESSAI DE CONSTITUTION, EN LABORATOIRE D'UN LOT DE CIMENT "HOMOGENE"**

Considérons un lot de ciment d'environ 150 kg constitué ainsi : Le clinker est broyé en laboratoire et en même temps complété par une addition de gypse. A la sortie du broyeur, le ciment est homogénéisé et stocké en fûts "étanches"***. Chaque fût contient la quantité de ciment pour réaliser un essai (un essai comporte les mesures simultanées sur quatre éprouvettes). Chaque fût, une fois rempli, n'est donc réouvert qu'une seule fois, au moment de l'essai.

Deux lots ont été ainsi fabriqués avec deux ciments C.P.A. désignés par A et B. La teneur potentielle en aluminat tricalcique du ciment A est supérieure à celle du ciment B. Les tableaux I et II donnent respectivement les compositions minéralogique et chimique des ciments étudiés.

TABLEAU I
COMPOSITION CHIMIQUE CENTÉSIMALE DES CEMENTS ÉTUDIÉS***

Ciments	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	CO ₂	Ch.L.
A	18.78	7.37	2.44	62.98	2.92	.25	.22
B	22.15	4.84	1.52	67.11	1.43	.30	.63

TABLEAU II
COMPOSITION MINÉRALOGIQUE POTENTIELLE DES CLINKERS DES CEMENTS ÉTUDIÉS****

La composition chimique indiquée est celle qui existerait si tous les équilibres chimiques étaient atteints au cours de l'hydratation. C'est la composition chimique potentielle des clinkers calculée selon les formules de Bogue.

Ciments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	GYPSE	CARB.	C ₃ A cristallisé
A	50.28	15.91	15.39	7.41	6.28	.57	7.1
B	62.08	16.67	10.25	4.62	3.07	.68	3.9

Signification des symboles

- C₄ AF : Alumino-ferrite tétracalque; Al₂ O₃, Fe₂ O₃, 4 Ca O
 - C₃ A : Aluminat tricalcique; Al₂ O₃, 3 Ca O

- C₂ S : Silicate dicalcique; Si O₂, 2 Ca O
 - C₃ S : Silicate tricalcique; Si O₂, 3 Ca O

* Lot de ciment « homogène » : ciment broyé en laboratoire, homogénéisé et stocké en fûts étanches. Le lot est, de ce fait, réputé homogène.

** L'étanchéité des fûts doit être précisée : ces fûts réputés étanches ne le sont pas vis-à-vis des gaz : l'expérience suivante le montre : un fût vide refermé dans une atmosphère d'hygrométrie 50% est transporté dans une hygrométrie saturée. L'hygrométrie à l'intérieur du fût qui est de 50% au départ augmente linéairement après un jour et atteint 85% au bout de quatre jours. Les fûts des ciments destinés aux expériences ont été stockés dans une atmosphère sèche (20 °C, hygrométrie 50%) mais à teneur en gaz carbonique assez forte.

*** Les analyses ont été effectuées suivant la méthode rapide de I.-A. Voïnovitch et coll. [10].

**** Ces résultats tiennent compte des remarques de F.-X. Deloye sur la formule de Bogue [11].

Pour ces essais, le processus opératoire défini au Chapitre 1, a été suivi excepté en ce qui concerne le temps écoulé entre la fin de malaxage de la pâte de ciment et le début de la vibration qui pouvait prendre trois valeurs : 15, 30 ou 60 minutes. Les essais ont été réalisés selon deux variantes : éprouvette "exposée" ou éprouvette "protégée".

3 - DISPERSION DE RESULTATS OBTENUS A PARTIR D'UN LOT DE CIMENT "HOMOGENE"

Les figures 25 et 26 montrent les fuseaux dans lesquels s'inscrivent en fonction de l'âge de la pâte de ciment les valeurs de la déformation des éprouvettes. La largeur de ces fuseaux est sensiblement du même ordre que celles constatées sur les figures 13 à 22.

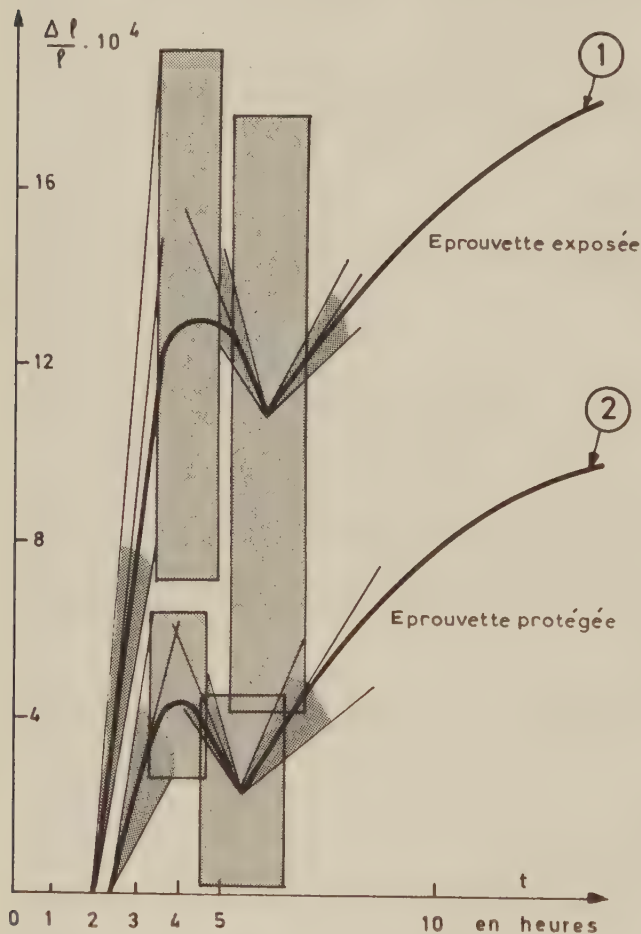


Fig. 25 - Fuseau de la déformation de la pâte normale du ciment A. Échantillons prélevés dans un lot préalablement homogénéisé. La courbe en trait plein à l'intérieur du fuseau est la courbe moyenne.

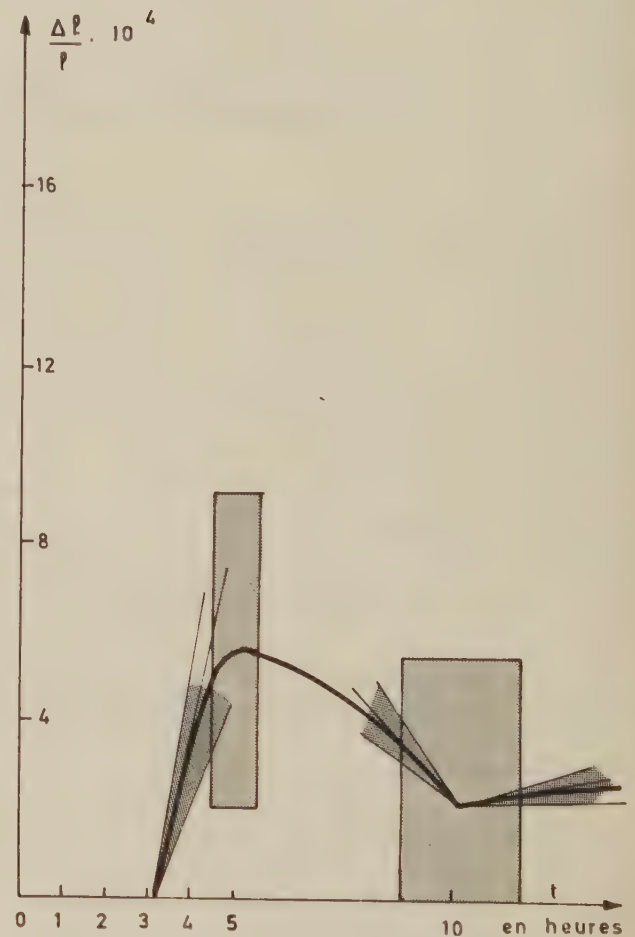


Fig. 26 - Fuseau de la déformation de la pâte normale du ciment B (épreuve exposée). Échantillons prélevés dans un lot préalablement homogénéisé.

Cette dispersion se manifeste principalement pendant le premier retrait. Si l'on prend comme origine des âges et des déformations l'état de l'éprouvette à la fin du premier retrait, on obtient les courbes de la figure 27 qui montrent l'évolution des déformations au-delà du premier maximum de déformation. On constate que cette évolution s'inscrit dans un fuseau beaucoup plus étroit que précédemment.

Pour étudier plus en détail les éléments de cette dispersion, on a caractérisé les courbes de déformation par un nombre limité de paramètres qui sont définis sur la figure 28, leur dispersion étant donnée sur le tableau III. Le retrait au premier âge est divisé selon les trois périodes indiquées au Chapitre 3 : premier retrait, premier gonflement, second retrait. Les paramètres choisis sont, pour chaque période, l'âge et la déformation à l'instant initial et la vitesse maximale de déformation.

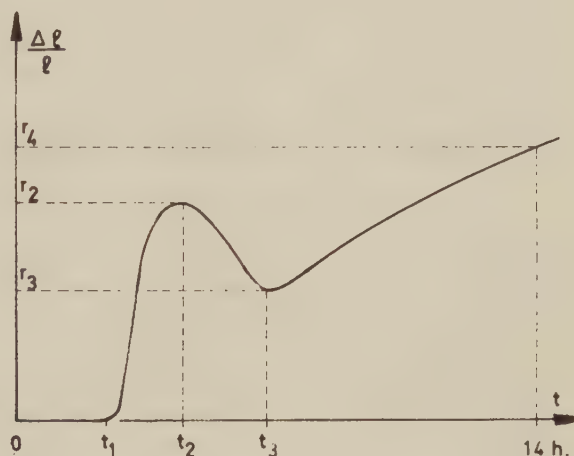
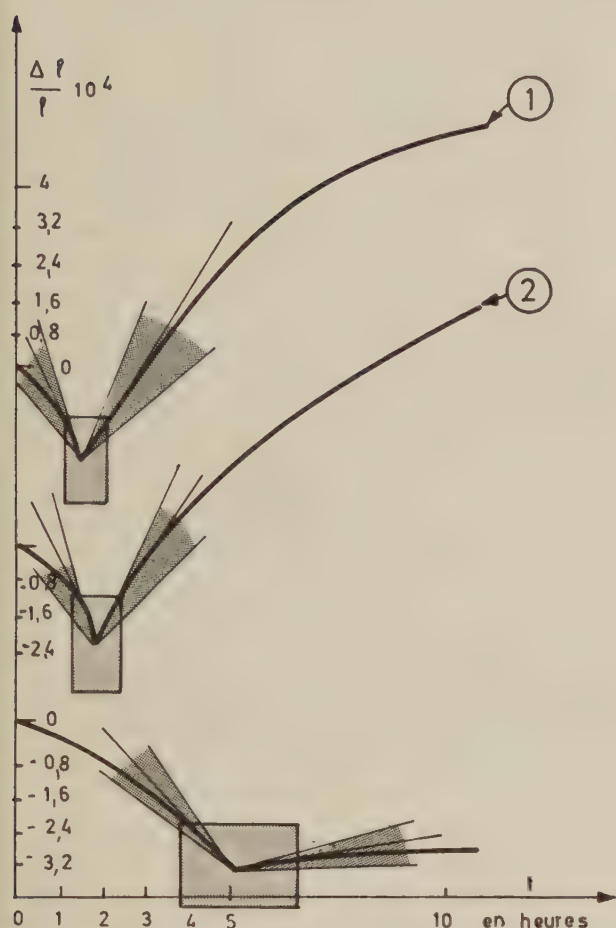


Fig. 28 - Schéma d'une courbe type de déformation d'une pâte de ciment indiquant les paramètres dont la dispersion a été étudiée.

Fig. 27 - Comparaison entre les fuseaux obtenus pour le ciment A (éprouvette exposée 1, ou protégée 2) et le ciment B au-delà du premier maximum de retrait pris comme origine des déformations.

Les valeurs des paramètres t_1 , t_2 , t_3 , âges auxquels les déformations commencent ou changent de sens, sont indépendantes des variations de la force de frottement entre l'éprouvette et le moule. Dans des séries d'essais, l'écart-type de la variation de ces âges est compris entre 8 et 35 minutes. On remarque que :

- pour le ciment A, les écarts-types sont du même ordre, que l'éprouvette soit "exposée" ou "protégée". Or, dans le dernier cas, l'hygrométrie de la salle d'essai n'intervient pas. Il semble donc que les fluctuations hygrométriques ($50 \% \pm 3 \%$) interviennent peu sur ces temps, dans le premier cas également.
- pour le ciment A, l'écart-type de l'âge auquel le second retrait commence, diminue de 13 à 8 minutes lorsque le délai entre fin de malaxage et mise en place augmente de 15 à 60 minutes. Cet effet ne se manifeste pas dans le cas du ciment B puisque l'écart-type est maximal pour un délai de 30 minutes ;
- pour les ciments A et B, l'âge le plus variable est celui du début de second retrait. Pour B, les valeurs particulièrement élevées de l'écart-type s'expliquent, en partie, par l'imprécision de la détermination graphique ;

TABLEAU III

DISPERSION DES PARAMETRES DE LA COURBE DE DEFORMATION DES PATES

CIMENTS	(1)	(2)	t_1 (mn)	t_2 (mn)	t_3 (mn)	t_3-t_2 (mn)	(3)	r_2 (μ)	r_3-r_2 (μ)	r_4 (μ)	r_4-r_2 (μ)	p_3 $\mu / 2h$
A Eprouvette exposée	15' (15)	MOY. E.T.	121,3 12,6	252 14,9	362,1 17,4	110,1 11,2	MOY. C.V.	328,1 15,6	-56,8 16,4	452,3 11,8	124,2 8,4	76,7 12,1
	30' (9)	MOY. E.T.	131,7 10,5	263,6 14,7	357,9 14,8	94,3 9,2	MOY. C.V.	319,1 12,1	-46,3 16	458,8 9,9	139,7 12,9	75 14
	60' (11)	MOY. E.T.	146,4 8	281,7 10,3	372,9 15,9	91,2 10	MOY. C.V.	326,9 7,2	37,7 12	466,5 6,5	139,6 6,5	72,3 13,6
	15' (9)	MOY. E.T.	144,2 12,4	236,9 14	332,1 19,8	95,2 10,4	MOY. C.V.	112,1 13,9	-52,8 15,3	246,3 8,9	134,2 8,5	79,4 16,4
	30' (7)	MOY. E.T.	157,3 7,7	244,9 11,7	340,6 10,3	95,7 6,3	MOY. C.V.	106,3 13	-45,7 13,4	245,3 4,5	139 5,8	79,3 16,7
	60' (9)	MOY. E.T.	173,9 8	254,9 15,6	351,3 17	96,4 5,4	MOY. C.V.	91,9 12,6	-40,4 8,1	236,2 5,7	144,3 2,8	81,7 14,1
B Eprouvette exposée	15' (20)	MOY. E.T.	193,2 17,6	304 10,3	614,5 27,5	310,5 28,3	MOY. C.V.	139,5 21,4	-83,8 10	66,6 42,4	72,9 10,4	8,6 23,8
	30' (18)	MOY. E.T.	197,4 23,1	311,3 20,1	622,3 35,5	311 41,7	MOY. C.V.	139,9 25,9	-85,9 10,1	65,9 44,6	74 13,3	8,9 25,9
	60' (14)	MOY. E.T.	198,9 9,6	313,7 11,5	640,6 29,4	326,9 35,5	MOY. C.V.	164,1 14	-89,9 8,5	83,2 28,3	80,9 8,4	8,9 33

- (1) Les temps indiqués sont ceux entre la fin du malaxage et le début de la vibration. Les chiffres entre parenthèses indiquant le nombre d'essais.
- (2) MOY : Moyenne (en minutes) ; E.T. : Ecart type (en minutes).
- (3) MOY : Moyenne (en microns) ; C.V. : Coefficient de variation en %. Les paramètres t_1 , r_2 , etc. sont définis sur la figure 1.

- pour le ciment A, et contrairement au ciment B, la durée du gonflement varie peu comparativement aux âges de début et de fin. Cette propriété est particulièrement nette lorsque l'éprouvette est "protégée".

On a montré la grande influence du frottement entre le moule et l'éprouvette sur les valeurs du premier retrait ; au delà, en général, les contraintes développées dépassent les forces de frottement. Il est vraisemblable que, dans les conditions expérimentales définies au Chapitre 1, ce frottement soit assez régulier. En effet, le coefficient de variation de la valeur maximale de premier retrait est d'environ 13 % pour le ciment A*, plus élevé pour le ciment B mais, dans ce cas, les valeurs de retrait sont 2 à 3 fois plus faibles et le frottement intervient davantage.

Les résultats obtenus pour les valeurs du gonflement ($r_3 - r_2$) et du second retrait à 14 heures ($r_4 - r_2$) confirment que le frottement n'intervient pas sur ces grandeurs. Non seulement l'écart-type devient très faible (en général inférieur à 10 microns) mais le coefficient de variation est également diminué (6 % pour le ciment A lorsque l'éprouvette est protégée).

* Ce coefficient de variation peut-être comparé à celui de 12% indiqué par R. Peltier [3] pour la résistance à la compression du mortier normal âgé de 2 jours.

La vitesse maximale de second retrait p_3 a un coefficient de variation compris entre 12 et 16 % pour le ciment A, plus élevé pour le ciment B (jusqu'à 33 % mais, pour ce ciment les vitesses sont bien plus faibles).

Si l'on compare, pour chaque paramètre, les valeurs obtenues pour les ciments A et B* on constate que les valeurs du premier retrait maximal (r_2) comme celles de la vitesse maximale de second retrait (p_3) sont significativement différentes ; les moyennes sont dans le rapport de 1 à 2 pour les premiers retraits et de 1 à 9 pour les vitesses maximales de second retrait.

4 - VARIABILITE DES ECHANTILLONS DE CIMENT PRELEVES DANS UN LOT "HOMOGENE". INFLUENCE SUR LA DISPERSION DES RESULTATS.

Bien que l'analyse de la dispersion montre que la maîtrise des conditions expérimentales est au moins comparable à celle d'autres essais plus classiques ou normalisés, elle ne permet pas de mettre en évidence la variabilité du ciment anhydre. Pour cela, il suffit de montrer que la variation d'un des paramètres de la déformation dépend de la valeur d'une caractéristique de ciment anhydre. La figure 29 montre les variations corrélatives entre l'âge de la pâte de ciment au début du premier retrait et la surface spécifique B.E.T. du ciment anhydre**. Les résultats permettant cette corrélation sont peu nombreux, car chaque mesure de B.E.T. prend plusieurs jours***. Cependant les coefficients de corrélation d'environ 0,80 permettent de mettre en évidence une tendance statistiquement significative. Puisque les processus opératoires des mesures du premier retrait et du B.E.T. sont indépendants, la cause des variations ne peut pas être uniquement expérimentale et doit être imputée à la variabilité du ciment anhydre : dans un lot de ciment "homogène" (broyé en laboratoire, homogénéisé et stocké en fûts étanches), deux échantillons prélevés à des dates différentes en différents fûts peuvent ne pas être semblables.

Il reste à montrer que cette variabilité influe sur la valeur du premier retrait. C'est ce qui résulte des corrélations de la figure 30 entre l'âge au début du premier retrait et la valeur maximale de celui-ci. Le coefficient de corrélation est moins élevé que précédemment (0,70) car les irrégularités du frottement entre le moule et l'éprouvette interviennent.

Les variations du ciment à l'intérieur d'un lot "homogène" modifient la valeur du premier retrait.

Le sens de ces variations peut surprendre. Lorsque la surface B.E.T. augmente, l'âge de la pâte de ciment au début du premier retrait augmente et la valeur maximale de premier retrait diminue. Il est généralement admis cependant que le retrait augmente avec la surface spécifique. Cette apparente contradiction doit être examinée.

Auparavant il faut souligner que pour mettre en évidence les corrélations de la figure 29, il a fallu choisir une origine des temps différente pour les ciments A et B. Pour A, c'est la fin du malaxage, pour B, la fin de la mise en place.

* En admettant que leur dispersion suit une loi normale.

** Surface spécifique mesurée selon la méthode mise au point en 1938 par Brunauer, Elmett et Teller, fondée sur les lois d'adsorption des gaz par les corps poreux. Cette méthode a été développée au L.C.P.C. par F.X. Deloye. [6]

*** Depuis ces mesures, F.X. Deloye a réalisé un appareil B.E.T. «de routine» pour lequel les manipulations sont plus rapides.

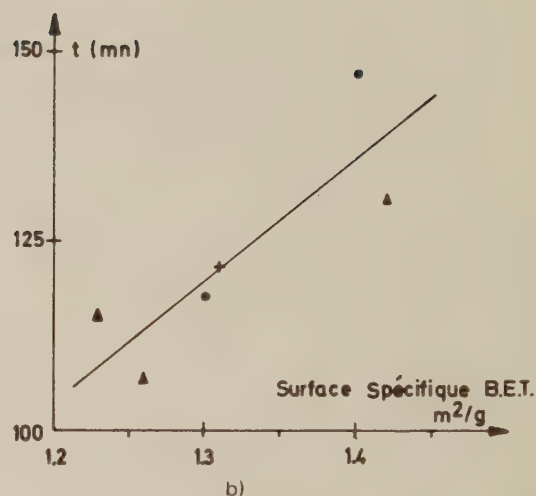
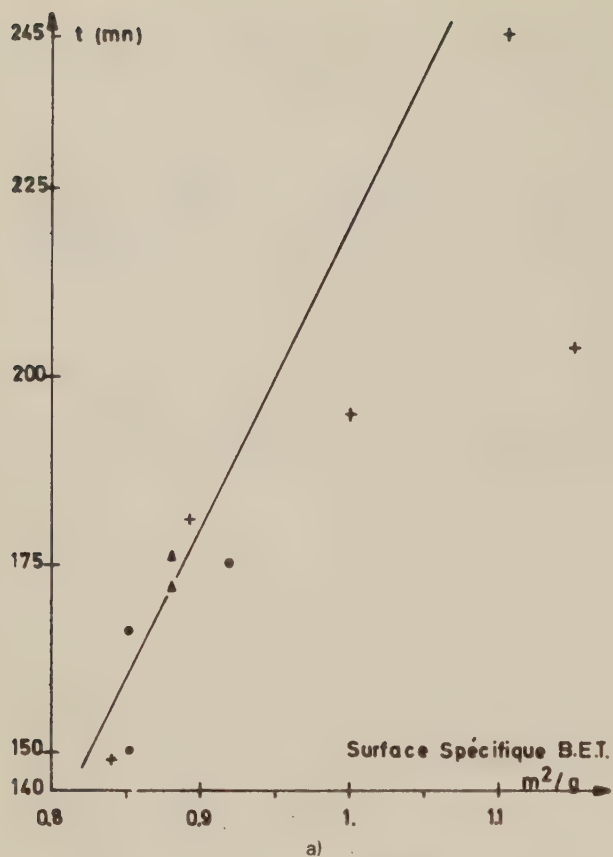


Fig. 29 - Corrélation entre l'âge de la pâte (t en minutes) au début du retrait et la surface spécifique du ciment anhydre. La durée entre fin de malaxage et début de vibration est de 15 minutes (croix), 30 minutes (cercles) ou 60 minutes (triangles).
a) Ciment A. L'origine des temps est la fin de la mise en place. Coefficient de corrélation : 0,83
b) Ciment B. L'origine des temps est la fin de la mise en place. Coefficient de corrélation : 0,80

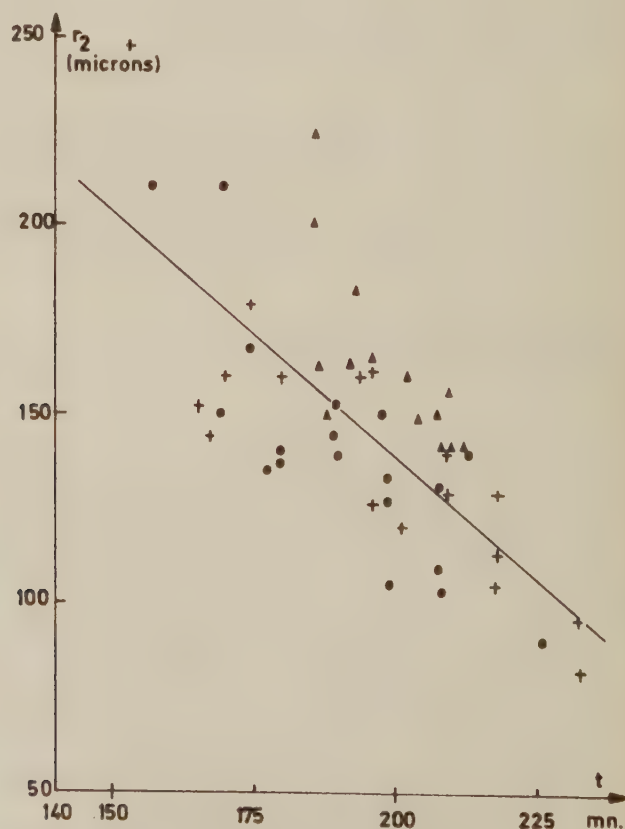
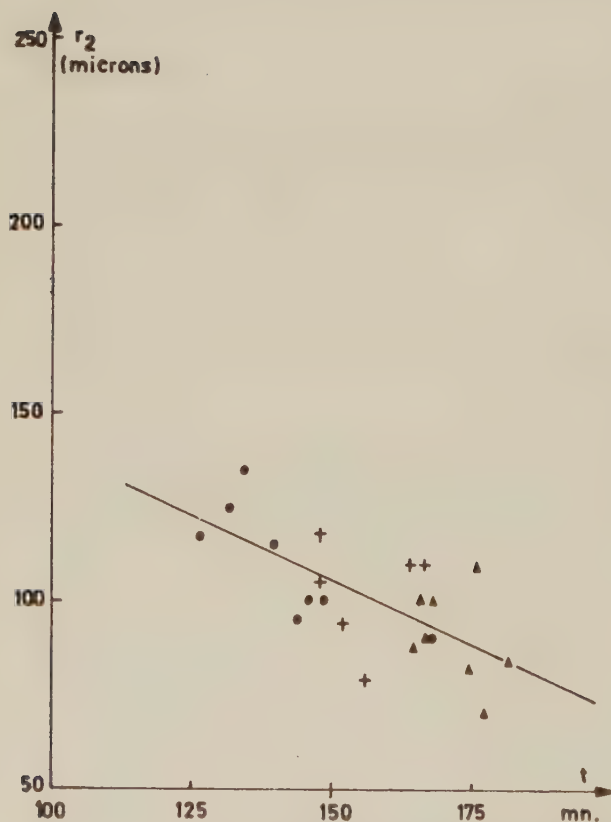


Fig. 30 - Corrélation entre l'âge de la pâte au début du retrait et la valeur du premier maximum de retrait (r_2). Les conventions sont les mêmes que pour la figure 17. Coefficient de corrélation 0,77.

5 - ESSAI D'ANALYSE DE LA CAUSE DE LA VARIABILITE DES CEMENTS ANHYDRES A L'INTERIEUR D'UN LOT REPUTE "HOMOGENE".

L'évaporation de l'eau interne, la dissolution, la cristallisation, étant des phénomènes de surface, il est logique que le retrait augmente avec la surface spécifique, à condition cependant que, lorsque la surface augmente, la nature des phases en contact reste inchangée.

Dans le cas des essais décrits ci-dessus, ce n'est sans doute pas le cas puisque du fait de l'homogénéisation, chaque échantillon de ciment a, au départ, la même surface spécifique et que les différences constatées doivent provenir d'une évolution du ciment anhydre postérieure à l'homogénéisation.

Selon T.-C. Powers [7]. "La différence entre la "surface macroscopique"* (des grains de ciment) et celle mesurée par adsorption pourrait être due à des fissures microscopiques ou submicroscopiques dans les grains de clinker. Les surfaces de telles fissures seraient prises en compte par la méthode d'adsorption mais non par l'autre. Dans la mesure où de telles fissures n'ont pas été communément relevées, il semble plus probable que la différence soit due à une légère enveloppe de produits hydratés, recouvrant la surface des grains".

Cette "pré-hydratation"*** peut être le résultat de l'action combinée de l'eau (le ciment réputé anhydre en contient en général au moins 0,5 %) et du gaz carbonique (qui peut s'infiltrer progressivement, comme d'ailleurs, la vapeur d'eau dans un fût réputé étanche).

De la sorte, la structure superficielle d'un grain de ciment peut varier au cours du temps et cette variation peut être différente suivant le fût.

Quel que soit le mécanisme par lequel cette légère "pré-hydratation" influe sur la valeur du premier retrait, cette influence ne peut se manifester qu'à partir du moment où l'eau de gâchage entre en contact avec le grain de ciment, ce moment étant pris comme origine des temps.

Puisque pour démontrer l'influence de cette pré-hydratation sur le temps de démarrage du premier retrait, il faut prendre pour origine :

- pour le ciment A, la fin de la mise en place,
- pour le ciment B, la fin du malaxage,

on peut donc déduire que le contact entre l'eau et la surface originelle du grain anhydre s'est produit :

* Powers désigne par «surface macroscopique» la surface spécifique donnée par la méthode Wagner ou par la méthode Blaine.

** Pré-hydratation : réactions qui surviennent pendant le stockage du ciment anhydre avant la constitution du mélange ciment-eau

- pour le ciment A, à la fin de la mise en place,
- pour le ciment B, à la fin du malaxage.

Il est possible de proposer, de ce fait, l'explication suivante : au moment du malaxage, des réactions d'hydratations très vives se produisent. Il peut se former en particulier de la chaux ou du sulfo-aluminate calcique (sel de Candlot). Les produits hydratés formeraient une couche plus ou moins dense autour du grain de ciment. Le reste de l'eau de gâchage qui n'a pas participé à ces toutes premières réactions peut, si la couche de produit hydraté est suffisamment lâche, pénétrer jusqu'au grain originel de ciment avant la fin de malaxage. Ce premier cas est celui du ciment B dont la teneur potentielle en aluminate tricalcique est faible. Si, au contraire, la couche de produit hydraté est dense, l'eau ne pénétrera que lentement à travers cette couche jusqu'au grain originel de ciment ; sa pénétration sera accélérée par les ondes de pression qui se propagent dans la pâte au moment de la mise en place (effectuée, dans ces expériences, par vibration). Ce deuxième cas se produit pour le ciment A dont la composition potentielle est riche en aluminate tricalcique.

Puisque parfois la vibration est nécessaire pour mettre l'eau de gâchage en contact avec le grain de ciment anhydre, il est donc nécessaire :

- en laboratoire - de considérer le temps entre la fin de malaxage et le début de la vibration comme un paramètre important dont la valeur doit être fixée dans tous les processus opératoires.*
- sur chantier - d'assurer la régularité du temps de transport et de l'énergie de vibration. Un défaut local de vibration peut, même s'il ne diminue pas la compacité, retarder de quelques heures le contact de l'eau et du ciment et créer de ce fait un retard local des réactions de prise et donc, par un mécanisme décrit au Chapitre 5, une fissuration. Des fissures pouvant résulter d'une cause semblable ont d'ailleurs été observées à plusieurs reprises dans la pratique. Elles apparaissent dans un revêtement à l'endroit où, au moment de la mise en place, un pervibrateur est tombé en panne. Les carottes prélevées à cet endroit ne permettent pas de détecter un défaut notable de compacité.

6 - PRE-HYDRATATION VOLONTAIRE DU CIMENT ANHYDRE

Si la dispersion, voire la diminution du premier retrait peuvent être causées par une pré-hydratation du ciment anhydre, il peut être intéressant de réaliser volontairement cette pré-hydratation.

Cinq heures avant la confection de la pâte, le ciment anhydre est pré-hydraté de la manière suivante : l'eau est pulvérisée sur la poudre de ciment brassée par les pales d'un malaxeur ; la quantité d'eau ainsi ajoutée (1 ou 2 % par rapport au poids de ciment) est déduite au moment de la confection de la pâte, de celle déterminée pour obtenir la consistance normale.

* A la suite de ces essais, le temps entre la fin de malaxage et le début de vibration, pour le processus opératoire de la mesure du retrait de la pâte de ciment au premier âge, a été fixé à 10 minutes.

La figure 31 montre l'effet de la pré-hydratation sur le premier retrait. Celle-ci modifie sensiblement la forme de la courbe de premier retrait.

Ce résultat peut être rapproché de ceux trouvés par Hernibrook et ses collaborateurs [8] .

"La pré-hydratation partielle du ciment moulu, fut faite au moyen de la vapeur à 100°C dans un tour rotatif, jusqu'à ce que la perte au feu soit d'environ 3 % dans un cas, de 5 % dans un autre. Le ciment fut ensuite remoulu à sa finesse primitive, après quoi on en détermina la chaleur d'hydratation, puis les résistances à la compression, après conservation à 25°C et à 65°C. On détermina aussi l'expansion de barres de mortier conservées dans l'eau et dans une solution à 2 % de sulfate de soude".

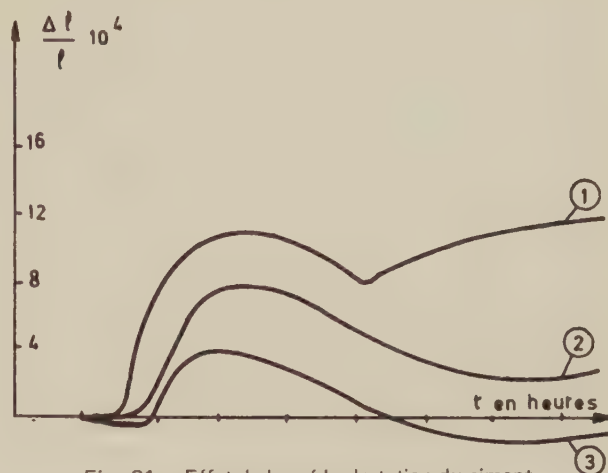


Fig. 31 - Effet de la pré-hydratation du ciment sur la déformation de la pâte.

- 1) Ciment non préhydraté
- 2) 1% d'eau (par rapport au poids de ciment) pulvérisé sur le ciment 5 heures avant l'essai
- 3) 2% d'eau.

"La diminution de la chaleur d'hydratation, pour tous les ciments, fut d'environ 6 calories au commencement et 4 calories par gramme après un an, pour chaque pour cent d'augmentation de la perte au feu. A 7 et 28 jours, tous les ciments portland normaux avaient une chaleur d'hydratation comprise dans les limites fixées par les spécifications de la Boulder Dam, excepté ceux avec 3 % de pré-hydratation conservés pendant 28 jours. Après traitement à 21°C, les ciments pré-hydratés avaient des résistances supérieures à ceux de la Boulder Dam à 7 et 28 jours, mais moindres à 1 an. Conservés à 65°C, les ciments pré-hydratés avaient des résistances moindres que ceux de la Boulder Dam à toutes les périodes. La pré-hydratation a augmenté la résistance chimique à l'action des solutions de sulfates".

L'effet de cette pré-hydratation est cité par P.H. Bates [9] parmi les 3 moyens pour diminuer la chaleur d'hydratation. Les deux autres moyens étant :

- changement de la composition du ciment ; diminution de l'alumine et de la chaux accompagnée d'une augmentation de la proportion d'oxyde de fer et d'une augmentation moindre de celle de la silice,
- traitement du clinker par la chaleur de façon à faire varier les proportions des phases vitreuses.

7 - LA DISPERSION, DU LABORATOIRE A L'USINE

Après avoir montré que, même pour un lot constitué avec soin en laboratoire, les propriétés de ciment anhydre étaient variables, il reste à estimer la valeur de la dispersion en pratique.

La figure 32 montre plusieurs courbes de retrait correspondant à des échantillons prélevés à différents moments au cours d'un mois de production d'une même cimenterie. Le coefficient de variation du premier retrait, calculé sur sept valeurs est de 44 %, presque trois fois plus grand que celui trouvé pour un lot de ciment homogénéisé. Dans ces conditions, si l'on compare deux ciments tels que A et B, sur des lots équivalents chacun à l'ensemble des approvisionnements d'un chantier, leurs valeurs de premier retrait maximal ne sont plus significativement différentes ; par contre, celles des vitesses maximales de second retrait, le sont encore.

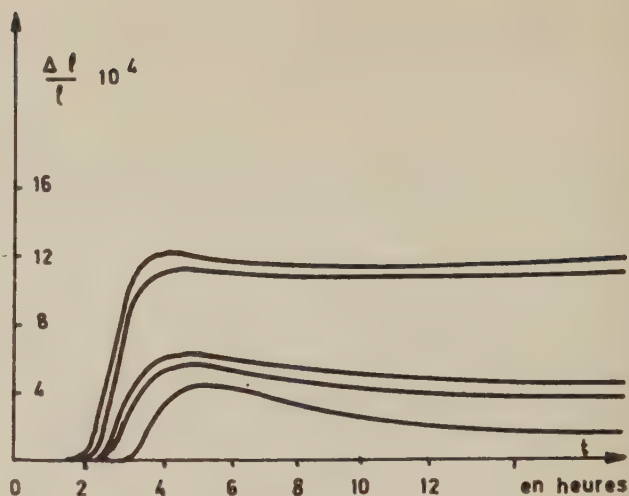


Fig. 32 - Dispersion de la déformation de la pâte d'échantillons d'un même ciment prélevés en usine à des dates différentes.

8 - CONCLUSIONS

La mesure du retrait d'une pâte de ciment normale donne des résultats dispersés comme de nombreux autres essais et mesures concernant les ciments.

On a pu montrer que cette dispersion ne provenait pas uniquement des imprécisions du processus expérimental. Dans un fût métallique claveté et considéré habituellement comme étanche dans les laboratoires de béton, le ciment anhydre évolue.

Face à cette difficulté expérimentale, on pourrait peut être imaginer des méthodes plus élaborées de conservation du ciment anhydre. On risquerait alors de s'écarter du problème concret justifiant cette recherche : la fissuration spontanée des bétons routiers.

Par une démarche opposée, on peut considérer que s'il est vrai, comme il sera montré au Chapitre 5, que le risque de fissuration dépend du ciment choisi, il doit exister une caractéristique, intervenant dans le mécanisme de fissuration, dont la valeur, malgré la dispersion, permette de distinguer ces ciments.

L'étude de la dispersion apporte, dans cette perspective, un résultat partiel puisqu'il a été montré que le paramètre "vitesse maximale de second retrait" était celui qui permettait de différencier le plus nettement les ciments A et B.

La vitesse maximale de second retrait sera, pour cette raison, étudiée plus particulièrement aux Chapitres suivants. Cependant son rôle dans la fissuration ne sera examiné qu'au Chapitre 6.

CHAPITRE 3

PREMIER ET SECOND RETRAIT DES PATES DE CIMENT

A un certain stade de son évolution, une éprouvette de pâte de ciment gonfle qu'elle soit exposée (à une atmosphère non saturée) ou protégée, calorifugée ou non, voire isotherme*. Ce résultat expérimental est partiellement nouveau car, jusqu'à présent, le gonflement a surtout été observé sur des éprouvettes conservées dans l'eau. Cette période de gonflement séparant deux périodes de retrait conduit à distinguer le "premier retrait" et "le second retrait" (Fig. 33).

Le premier retrait a déjà été étudié sous des noms différents : retrait plastique pour W. Lerch [12], R. Dutron et A. Mommens [2], retrait du mortier frais pour D. Ravina et R. Shalon [13], retrait au premier âge pour P. L'Hermite et L. Vironnaud [1] enfin, premier retrait (early shrinkage) pour B.W. Shacklock [14] .

Le second retrait, par contre, ne semble pas avoir été observé par ces expérimentateurs, peut-être, pour deux raisons :

- ils n'ont pas eu la possibilité d'enregistrer les déformations et, par conséquent, un phénomène momentané peut échapper ou ne concerner qu'une mesure qui paraîtra alors aberrante ;
- ils ont réalisé leurs essais sur mortier et non sur pâte de ciment (sinon exceptionnellement).

Sur mortier, les périodes de gonflement et de second retrait ne sont pas visibles, sauf dans certains cas extrêmes lorsque, sur pâte de ciment, le phénomène est très accentué (Fig. 34).

Avec un dispositif expérimental très différent, M. del Campo [15] a observé systématiquement un point anguleux dans l'évolution, en fonction du temps, de la déformation volumique intrinsèque de la pâte de ciment en cours d'hydratation. Il est vraisemblable que c'est le même phénomène qui provoque ce point singulier et le second retrait. L'étude comparée de ces deux manifestations sera faite, au chapitre suivant, pour tenter une interprétation des mécanismes en cause.

* Ces termes correspondent aux différentes variantes du processus opératoire. Leurs définitions sont données au Chapitre 1 par.6.

Il peut sembler paradoxal de choisir comme matériau d'étude la pâte de ciment lorsqu'on veut approfondir les conditions de fissuration des bétons ; les raisons de ce choix sont données au Chapitre 6.

1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES PROPRIETES DU PREMIER RETRAIT

Les résultats des travaux cités plus haut montrent que :

- le premier retrait commence entre 0h30 et 2 h après la fin du malaxage et dure, en général, de 1 à 3 heures ;
- au cours de cette période le premier retrait augmente pratiquement linéairement en fonction du temps puis se stabilise assez brutalement ;
- la valeur maximale du premier retrait du mortier est toujours très élevée. Elle varie de 1 à $20 \cdot 10^{-3}$ suivant les conditions extérieures ;
- le premier retrait est provoqué par le dessèchement de l'éprouvette, soit vers l'extérieur soit vers l'intérieur (auto-dessiccation due à l'hydratation) ;
- les valeurs des premiers retraits de mortiers, composés à partir de différents ciments, essayés dans des conditions semblables, varient, au maximum, du simple au double ;
- un changement de consistance ou de dosage en eau du mortier provoque des variations du même ordre dont le sens peut parfois dépendre des conditions expérimentales (Fig. 35) ;
- pour une valeur constante du rapport E/C le premier retrait augmente rapidement en fonction du dosage en ciment (Fig. 36) ;
- les conditions climatiques ont une influence prépondérante sur le premier retrait : température, hygrométrie et vent surtout : à 20° et 45 % d'hygrométrie relative, la valeur maximale du premier retrait du mortier est, par exemple, de $0,8 \cdot 10^{-3}$ en air calme et $8 \cdot 10^{-3}$ avec un vent de 8 m/sec (29 km/h) [2] .
- l'application convenable de produit de cure sur les faces exposées permet de réduire fortement l'évaporation de l'eau interne. Les meilleurs produits on actuellement un "coefficient de protection" de 96 % et sont couramment utilisés, en France, sur les chantiers de revêtement routier.

Avec un produit de cure, peut être un peu moins bon, on constate que la valeur du premier retrait avec un vent de 36 km/h est réduite à celle du premier retrait sans vent ($0,8 \cdot 10^{-3}$) [2].

2 - QUELQUES OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES SUR LE PREMIER RETRAIT

Les résultats des essais réalisés dans le cadre de cette recherche confirment les indications précédentes ; ceux qui permettent de les compléter sont notés ici :

- si le premier retrait est important (de l'ordre de 10^{-3} et plus), par contre, les contraintes en jeu restent faibles. Une estimation peut en être faite à partir de l'étude des frottements (Chapitre 1 § 5.3) sans aucune hypothèse sur la nature rhéologique (d'ailleurs en évolution) du matériau :

Fig. 34 - Lorsque, sur pâte, le second retrait survient brusquement (courbe supérieure), on peut constater le même phénomène sur mortier (courbe inférieure). Ces résultats ont été obtenus dans des conditions isothermes.

Fig. 33 - Les trois périodes de la déformation d'une pâte normale:

- ① premier retrait
- ② gonflement
- ③ second retrait

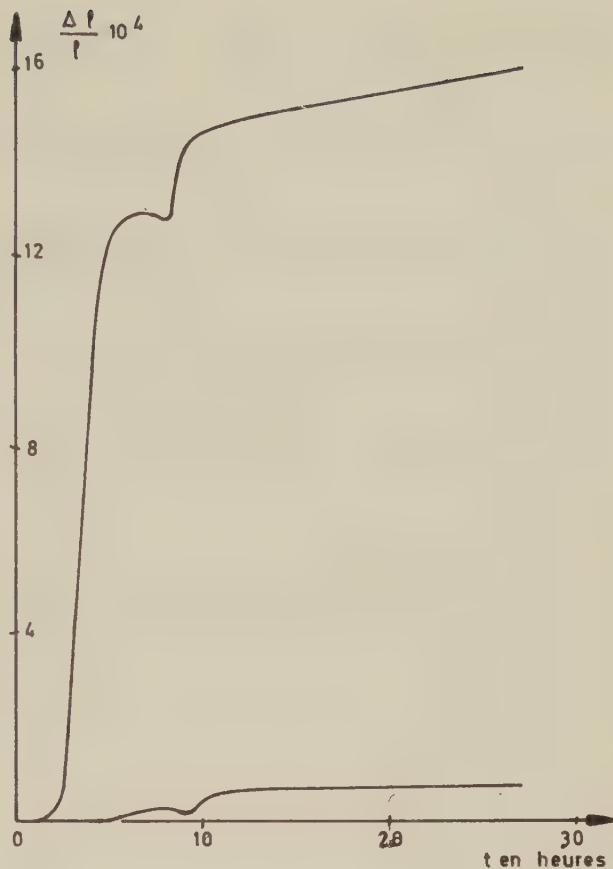


Fig. 35 - Évolution du premier retrait d'un mortier âgé de 6 heures, en fonction du rapport pondéral eau-ciment. (Résultat obtenu par J.-T. Simeonov - Sofia, Bulgarie). Cette courbe semble montrer que plusieurs phénomènes interviennent dans le premier retrait. La valeur de E/C pour laquelle le premier retrait est minimal peut dépendre des conditions expérimentales en raison, notamment, du ressuage.

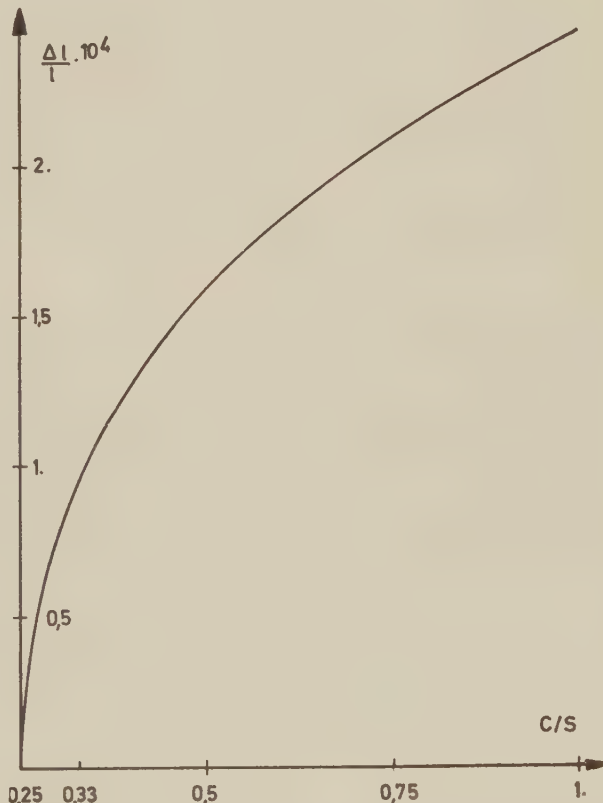


Fig. 36 - Évolution du premier retrait d'un mortier âgé de 6 heures, en fonction du rapport pondéral ciment - sable ($E/C = 0,5$) (même source que la Fig. 35).

Pour une pâte de ciment exposée à une atmosphère de 20°C et 50 % d'hygrométrie relative, la contrainte maximale est d'environ 0,13 bar*. Avec un vent de 30km/h elle serait sans doute environ multipliée par dix et pourrait provoquer la rupture. Inversement, un produit de cure efficace, convenablement réparti, peut suffire à éviter ce type de fissure ;

- les résultats obtenus en préhydratant les ciments (Chapitre 2 § 6) montrent l'incidence de l'hydratation du ciment sur le premier retrait (Fig. 37) ;
- le premier retrait se manifeste non seulement en surface mais également en profondeur (Fig. 38) du fait de la dessiccation interne due à l'hydratation.

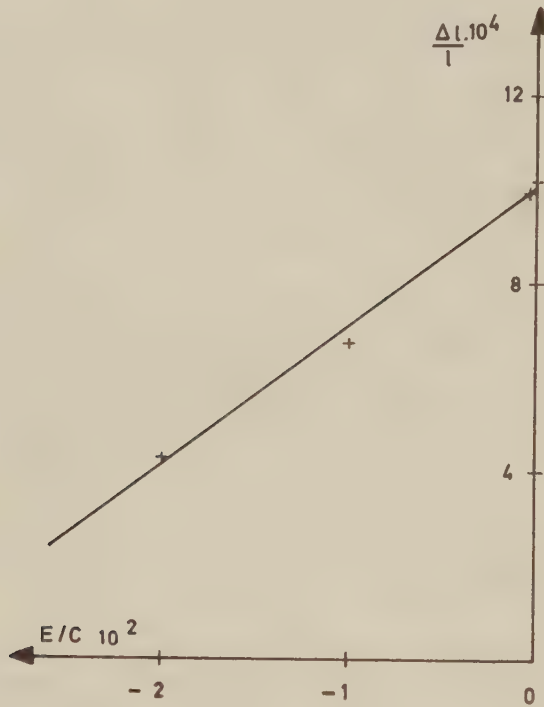


Fig. 37 - La valeur maximale du premier retrait diminue d'autant plus que la proportion d'eau mélangée au ciment, 5 heures avant l'emploi, est élevée.

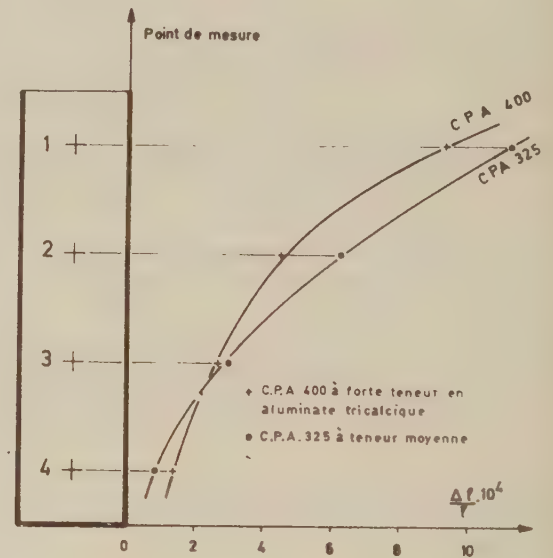


Fig. 38 - Variation du premier retrait d'une pâte normale en profondeur. L'éprouvette mesure 7 cm de large, 28 cm de long et 28 cm de profondeur. Au voisinage de la surface exposée (en haut), le premier retrait est plus fort, du fait de l'évaporation de l'eau interne. Les déformations, près du fond du moule, sont fortement réduites par les frottements.

3 - OBSERVATIONS PRELIMINAIRES SUR LE SECOND RETRAIT

Elles sont déduites de l'examen des Fig. 25 et 26 du Chapitre 2 ; ces figures ont été choisies pour représenter deux cas extrêmes entre lesquels se situe l'ensemble des ciments étudiés jusqu'à ce jour :

- le second retrait commence après une période de gonflement dont la durée est très variable (de deux heures à dix heures et plus) ;
- le second retrait peut apparaître d'une façon progressive ou, au contraire, instantanée (dans ce cas la courbe de déformation de l'éprouvette présente un point anguleux) ;

* La résistance à la traction du mortier âgé de 8 heures serait de 1,2 bars environ selon M. Brachet [16]. Cet âge est à peu près celui où le premier retrait du mortier est maximal.

- la vitesse de second retrait passe par une valeur maximale puis diminue ensuite constamment ;
- la valeur de cette vitesse maximale peut varier du simple au décuple suivant la nature du ciment (même si on considère uniquement des C.P.A.) ;
- le second retrait et le gonflement qui le précède ne sont pratiquement pas modifiés, que l'éprouvette soit exposée ou protégée. Le second retrait concerne donc la masse entière des éprouvettes et des ouvrages ;
- le second retrait coïncide souvent avec une diminution de la température interne des ouvrages liée à un ralentissement des réactions d'hydratation ; il inclut, dans ce cas, un retrait thermique. Cependant, le second retrait peut se manifester, même dans des conditions isothermes ; ce n'est donc pas un phénomène uniquement thermique.

Ces premières observations montrent qu'une partie au moins du second retrait semble directement liée au phénomène de l'hydratation des ciments.

CHAPITRE 4

DÉFORMATION DE LA PÂTE ET HYDRATATION DU CIMENT

On se propose d'essayer de relier la déformation de la pâte à une autre caractéristique de la pâte de ciment en cours de prise.

L'objectif est double :

- approfondir le mécanisme de la déformation ;
- remplacer une caractéristique nouvelle (la vitesse maximale de second retrait) par une autre, plus connue et déjà mesurée couramment, dans la perspective d'une recommandation technique étudiée au Chapitre 6 § 4.

La dynamique de l'hydratation du ciment est encore peu connue et cet objectif ne sera donc, au mieux, que partiellement atteint.

Le dégagement de chaleur dû aux réactions exothermiques de l'hydratation est une caractéristique assez facilement mesurable et bien étudiée, notamment par Lerch [17]. De plus les travaux de Powers [7] ont montré que plusieurs autres caractéristiques de la pâte en dépendaient linéairement ; par exemple, la quantité d'eau liée chimiquement et la surface spécifique des hydrates formés. Il semble donc naturel d'essayer de relier le second retrait et la chaleur d'hydratation.

1 - SECOND RETRAIT ET CHALEUR D'HYDRATATION

Pour la mesure de la chaleur d'hydratation, deux conditions peuvent être correctement et simplement définies : l'adiabatique et l'isotherme. Le second retrait doit être mesuré dans les mêmes conditions ; l'adiabatisme parfait n'ayant pu être réalisé*, la comparaison de ces deux caractéristiques a été faite dans des conditions isothermes et semi-adiabatiques.

1.1 - Etude comparée du second retrait et de la chaleur d'hydratation dans des conditions semi-adiabatiques.

Le second retrait et la chaleur d'hydratation sont mesurés sur deux éprouvettes distinctes fabriquées avec la même pâte de ciment à consistance normale (norme N.F. P 15 402).

* Chapitre 1 par.6.2

La mesure de la chaleur d'hydratation est faite suivant la méthode de la "bouteille thermos" mise au point au C.E.R.I.L.H. [18] . La mesure du second retrait est faite selon le processus opératoire décrit au Chapitre 1 sur une éprouvette "calorifugée" ou "non calorifugée" (Chapitre 1 § 6.2).

Dans ces conditions expérimentales la température de l'éprouvette change au cours de l'essai. Le second retrait inclut donc une variation de longueur d'origine thermique (coefficient de dilatation d'environ 13.10^{-6}) qui doit être déduite du résultat pour obtenir le second retrait proprement dit, lié éventuellement au mécanisme de l'hydratation et, comme on se propose de le vérifier, à la chaleur d'hydratation.

A partir de ces essais, la comparaison entre les deux caractéristiques ne peut pas être faite rigoureusement. A chaque instant la température de la pâte de ciment est différente d'une éprouvette à l'autre (comme d'ailleurs d'un point à l'autre dans la même éprouvette). Comme la cinétique de l'hydratation dépend de la température de la pâte, à un moment donné, l'hydratation n'est pas parvenue au même stade dans l'éprouvette servant à la mesure du retrait et dans celle servant à la mesure de la chaleur d'hydratation. Il faut donc renoncer à comparer à chaque instant, avec ce type d'essai, la valeur des deux caractéristiques ; nous nous proposons de le faire seulement à un instant particulier de leur évolution.

Si le second retrait* est lié à l'hydratation du ciment, il est vraisemblable que son début marque une étape importante du processus. On peut se demander si ce n'est pas celle où la vitesse de dégagement de chaleur est maximale ?

A l'un ou l'autre de ces deux évènements nous avons fait correspondre un indice empirique de maturité** égal à :

$$I_m = \int_0^a (\theta - 20) dt$$

Dans cette expression on désigne par :

t : le temps, en heures.

a : l'âge, en heures, de la pâte, compté à partir de la fin du malaxage jusqu'à l'évènement considéré.

θ : la température, en °C, mesurée au centre de l'éprouvette.

* Il s'agit du second retrait proprement dit, déduction faite des dilatations thermiques.

** D'autres indices ont déjà été proposés ; en particulier [19], par Nurse et Saul : $(\theta + 10) \times \text{âge en } ^\circ\text{C jour}$
 $\frac{\theta - \theta_a}{10} \cdot T$

ou Rastrup : $T_a = 2 \cdot 10$ (T_a est le temps de conservation à la température θ_a et T celui pendant lequel $\theta > \theta_a$)

L'indice de maturité retenu ici paraît convenir pour la période de prise du ciment lorsque la température est comprise entre 20 et 50°C. Elle est susceptible d'être utilisable pour certains problèmes d'étuvage des bétons.

Pour tester la validité de cet indice, on vérifie que, pour chaque ciment, sa valeur est approximativement la même au début du second retrait, que l'éprouvette soit calorifugée ou non (Fig. 39).

Le début de second retrait survient pour un indice de maturité sensiblement égal à celui de la pâte au maximum du dégagement de chaleur (Fig. 40). Il semble donc que :

dans des conditions semi-adiabatiques, le début du second retrait coïncide avec le ralentissement du dégagement de chaleur d'hydratation.

De plus, la vitesse maximale de second retrait d'une éprouvette calorifugée a tendance à être d'autant plus élevée que la vitesse maximale du dégagement de chaleur est plus forte (Fig. 41).

Ces corrélations ont été établies pour des pâtes de ciment composées à partir de 10 ciments du commerce (C.P.A., C.P.A.L. ou C.P.A.C.*) de classe 325 ou 400. Pour chaque ciment, trois échantillons, en moyenne, ont été utilisés.

1.2 - Etude comparée du second retrait de la chaleur d'hydratation dans des conditions isothermes.

La mesure de la chaleur d'hydratation a été faite au C.E.R.I.L.H. avec un calorimètre à conduction ; celle du second retrait, au L.C.P.C., selon le processus opératoire décrit (Chapitre 1 § 6.2., Fig. 13) sur une éprouvette isotherme. Les mesures sont donc faites sur deux éprouvettes distinctes mais composées avec la même pâte de ciment maintenue en tous points à 20° (au pire, $\pm 1^\circ$) pendant les essais.

Au même âge les pâtes de ciment de l'une ou l'autre des éprouvettes sont au même stade de l'hydratation ; il est donc possible de comparer, à chaque instant, le second retrait et la quantité de chaleur dégagée.

Vis-à-vis du gonflement et du second retrait, il a été montré (Chapitre 1 § 5 et Chapitre 3 § 3) que l'éprouvette "isotherme" se comportait d'une façon homogène et isotrope. Il est donc légitime d'exprimer le second retrait comme une variation relative du volume de l'éprouvette : $\frac{\Delta V}{V}$. Sur les figures 42, 43 et 44 on a donc tracé, l'évolution de $\frac{\Delta V}{V}$ en fonction de la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation : Q.

* Les sigles C.P.A.L. et C.P.A.C. désignent des C.P.A. avec addition de laitier (L) ou de cendre volante (C) à raison de $15 \pm 5\%$ du poids total.

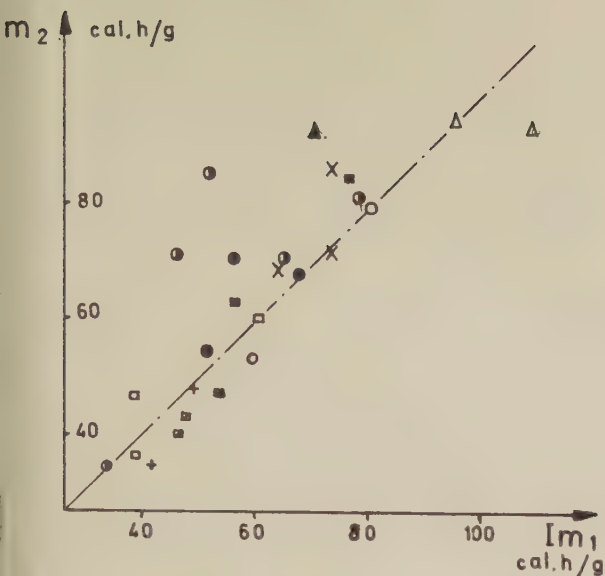


Fig. 39 - Corrélation entre les valeurs de l'indice de maturité lorsque commence le second retrait, sur une éprouvette de pâte normale, calorifugée (Im_1) et non calorifugée (Im_2). Chaque point représente un échantillon de ciment ; tous les échantillons d'un même ciment sont repérés de la même façon. La droite en traits d'axe est le lieu des points pour lequel $Im_1 = Im_2$; on constate que cette égalité est approximativement vérifiée pour tous les ciments. Coefficient de corrélation $r = 0,80$.

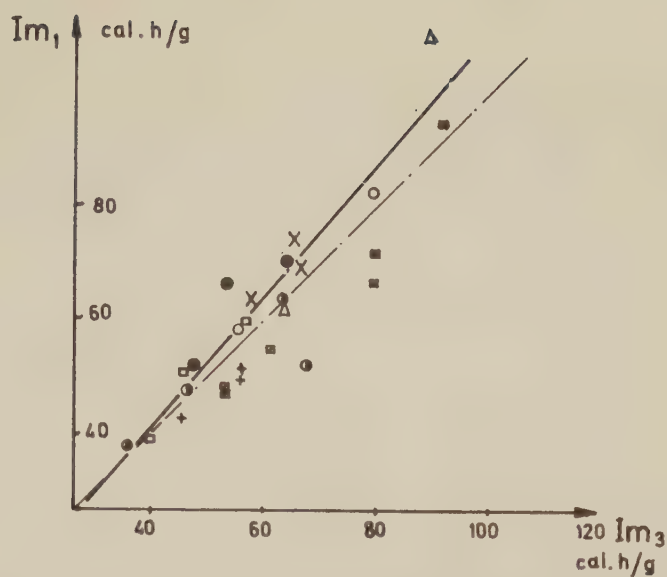


Fig. 40 - Corrélation entre les valeurs de l'indice de maturité lorsque commence le second retrait, sur une éprouvette de pâte normale, calorifugée au sens du chapitre 1, par.6 (Im_1) ou enfermée dans une bouteille "thermos" (Im_3).

En trait plein, la droite de régression ($Im_1 = 1,06 Im_3 - 4$) ; Coefficient de corrélation $r = 0,93$.

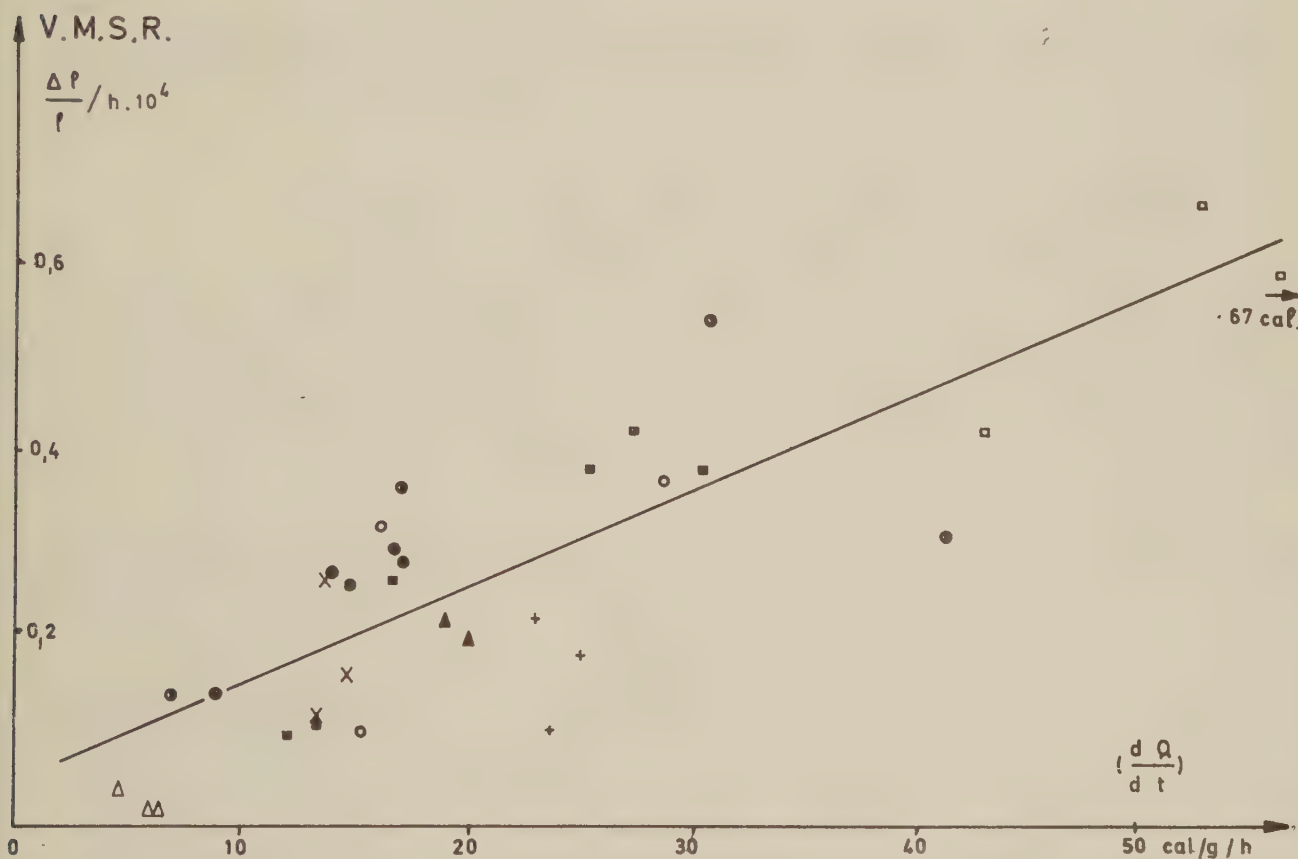


Fig. 41 - Corrélation entre la vitesse maximale de second retrait (V.M.S.R.) et la vitesse maximale de dégagement de chaleur $(\frac{dQ}{dt})_{max}$. Les conventions sont celles de la figure 39.

En trait plein, la droite de régression : $(\frac{d}{dt} \frac{\Delta l}{l})_{max} = 1,06 \cdot 10^{-6} (\frac{dQ}{dt})_{max} + 4 \cdot 10^{-6}$. Coefficient de corrélation : $r = 0,83$.

Les valeurs de $(\frac{dQ}{dt})_{max}$ sont très élevées ; cela tient à ce que les essais de calorimétrie adiabatique ont été faits, comme la mesure des déformations, sur la pâte pure. Le caractère technologique de ces essais contribue à affaiblir le coefficient de corrélation.

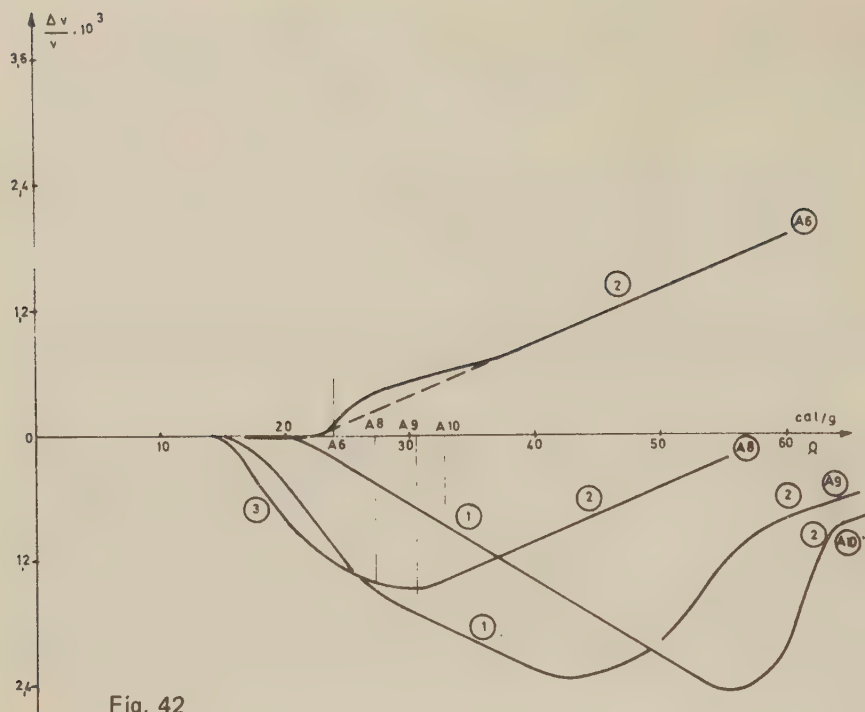


Fig. 42

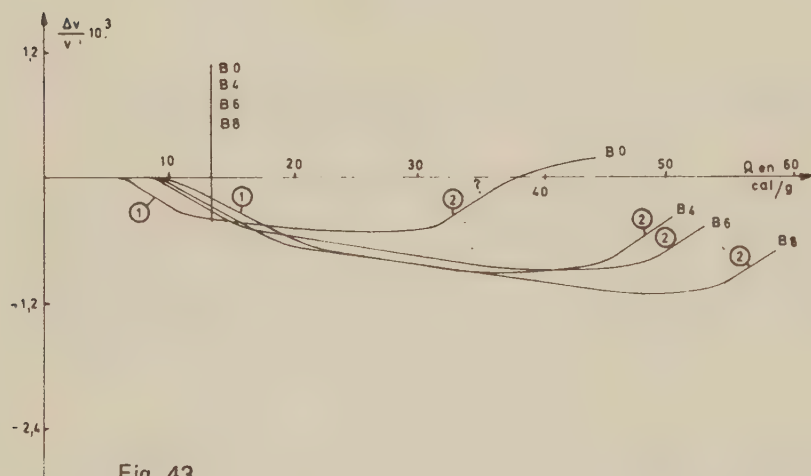


Fig. 43

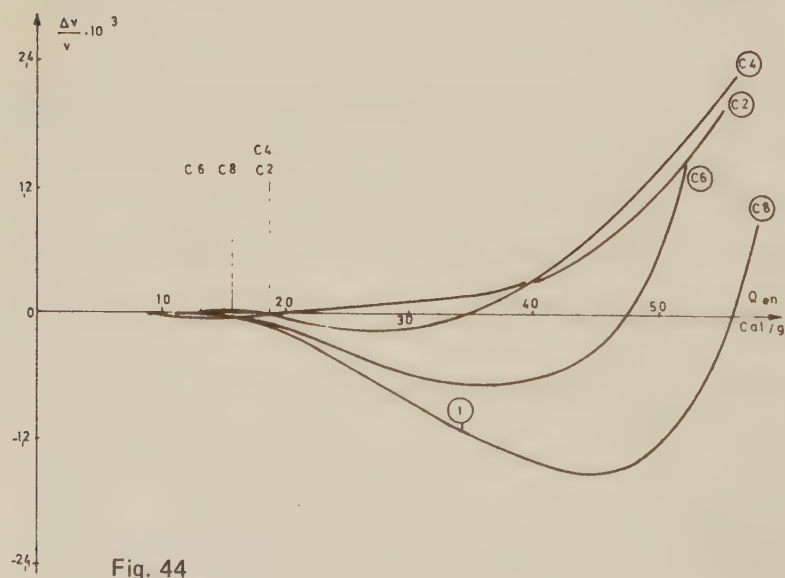


Fig. 44

Fig. 42, 43 et 44 - Évolution, en fonction de la quantité de chaleur dégagée, de la déformation de la pâte de ciment normale, au delà du maximum de premier retrait.

Les traits fins verticaux indiquent, pour chaque ciment, la quantité de chaleur dégagée au moment où la vitesse de dégagement est maximale.

On constate, (Fig. 42 et 43) pour tous les ciments d'un même clinker, que les parties ① et ② des courbes sont linéaires et parallèles.

Les courbes du clinker C représentent une évolution plus progressive. On retrouve cependant une partie 1 sur C8. Les particularités des ciments du clinker C sont peut être dues à la forte teneur de ce dernier en oxyde de magnésium.

Les essais portent sur 12 ciments composés à partir du 3 clinkers de teneur différente en C₃A ; pour chaque clinker : 4 dosages en gypse. La finesse Blaine des clinkers est de 3000 environ, celle du gypse de 5000. Le mélange clinker-gypse est réalisé juste avant le malaxage (Tableau IV).

TABLEAU IV
DÉNOMINATION DES CEMENTS ÉTUDIÉS *

CLINKERS	DOSAGE EN GYPSE (%) VALEUR DE $\frac{E}{C}$	0	2	4	6	8	9	10	N° DE FIGURE CORRESPONDANTE
A	0,28				A ₆	A ₈	A ₉	A ₁₀	42
B	0,26	B ₀		B ₄	B ₆	B ₈			43
C	0,27		C ₂	C ₄	C ₆	C ₈			44

* La composition chimique des clinkers est donnée en annexe à ce chapitre. Elle accompagne l'ébauche d'une étude de l'influence des teneurs en C₃A et en gypse sur les déformations de la pâte au premier âge.

On constate, à l'examen des figures 42, 43 et 44 que la variation de volume de la pâte en fonction de la quantité de chaleur dégagée est sensiblement différente suivant la nature du ciment ; en particulier, la phase de gonflement est terminée pour certains après un dégagement de 22 calories par gramme de ciment anhydre (A₆) et de 53 pour d'autres (B₈). A l'opposé, ces courbes présentent toutefois quelques similitudes. Non seulement, on remarque (surtout sur les Figures 42 et 43) des intervalles importants au cours desquels $\frac{\Delta V}{V}$ varie linéairement en fonction de Q, tant en gonflement qu'en retrait, mais les pentes de certaines de ces droites sont sensiblement les mêmes pour tous les ciments :

- en gonflement $\frac{d}{dQ} \frac{\Delta V}{V} = - b$, b valant environ $0,75.10^{-4}$
intervalle noté ① sur les courbes des ciments A, B et C₈
- en retrait $\frac{d}{dQ} \frac{\Delta V}{V} = a$, a compris entre 0,5 et $0,75.10^{-4}$
intervalle noté ② sur les courbes des ciments A et B.

La courbe du ciment A₈ comprend un intervalle noté ③ pour lequel on a

$$\frac{d}{dQ} \frac{\Delta V}{V} = - (a + b).$$

1.3 - Comparaison entre les résultats des essais semi-adiabatiques et isothermes.

Les résultats obtenus dans les conditions semi-adiabatiques suggèrent une relation linéaire entre le second retrait et la quantité de chaleur dégagée, valable à partir du moment où la vitesse de ce dégagement est maximale. Le premier examen des résultats des essais isothermes ne confirme pas cette hypothèse ; il ne l'infirme pas non plus complètement (le cas du ciment A6 est en accord avec elle).

En s'en tenant à ces premières constatations, il faudrait conclure que ce qui est approximativement valable en semi-adiabatique ne l'est plus en général en isotherme, que ce qui est vrai pour un ciment est faux pour l'autre. Les travaux de Powers [7] ont laissé entrevoir une si grande unité dans le mécanisme physique de l'hydratation qu'il est difficile d'admettre ces contradictions. Pour cette raison, nous avons été conduit à une interprétation des résultats expérimentaux guidée seulement par l'idée d'une similitude de comportement des différents ciments.

On a distingué, dans l'évolution de la déformation des pâtes de ciment, une période de gonflement et une de retrait. On suppose ainsi, implicitement, qu'il s'agit de deux phénomènes successifs au cours du processus d'hydratation. Il est au moins aussi vraisemblable d'admettre que ces deux phénomènes peuvent être simultanés et, qu'au début, le gonflement l'emporte, ensuite, le retrait.

Si, dans cette perspective, on considère la relation notée plus haut entre les pentes des intervalles ①, ② et ③ on est conduit à admettre qu'au cours des intervalles du type ① se produit à la fois un gonflement du type ③ et un retrait du type ② (Fig. 45). Le retrait commence, soit avant, soit, juste au début, des intervalles du type ① ; c'est également au cours de cet intervalle que la vitesse de dégagement de chaleur passe par un maximum pour les ciments A, B et C₈*. Par conséquent si, des résultats observés sur les éprouvettes isothermes, on écarte le phénomène de gonflement, il reste un retrait, dépendant linéairement de la quantité de chaleur dégagée dès (ou avant) le moment où la vitesse de ce dégagement est maximale.

* Pour les ciments C, l'intervalle ① n'apparaît pas pour C2 et C6 ; pour C4, la tangente à l'origine est parallèle aux droites ①.

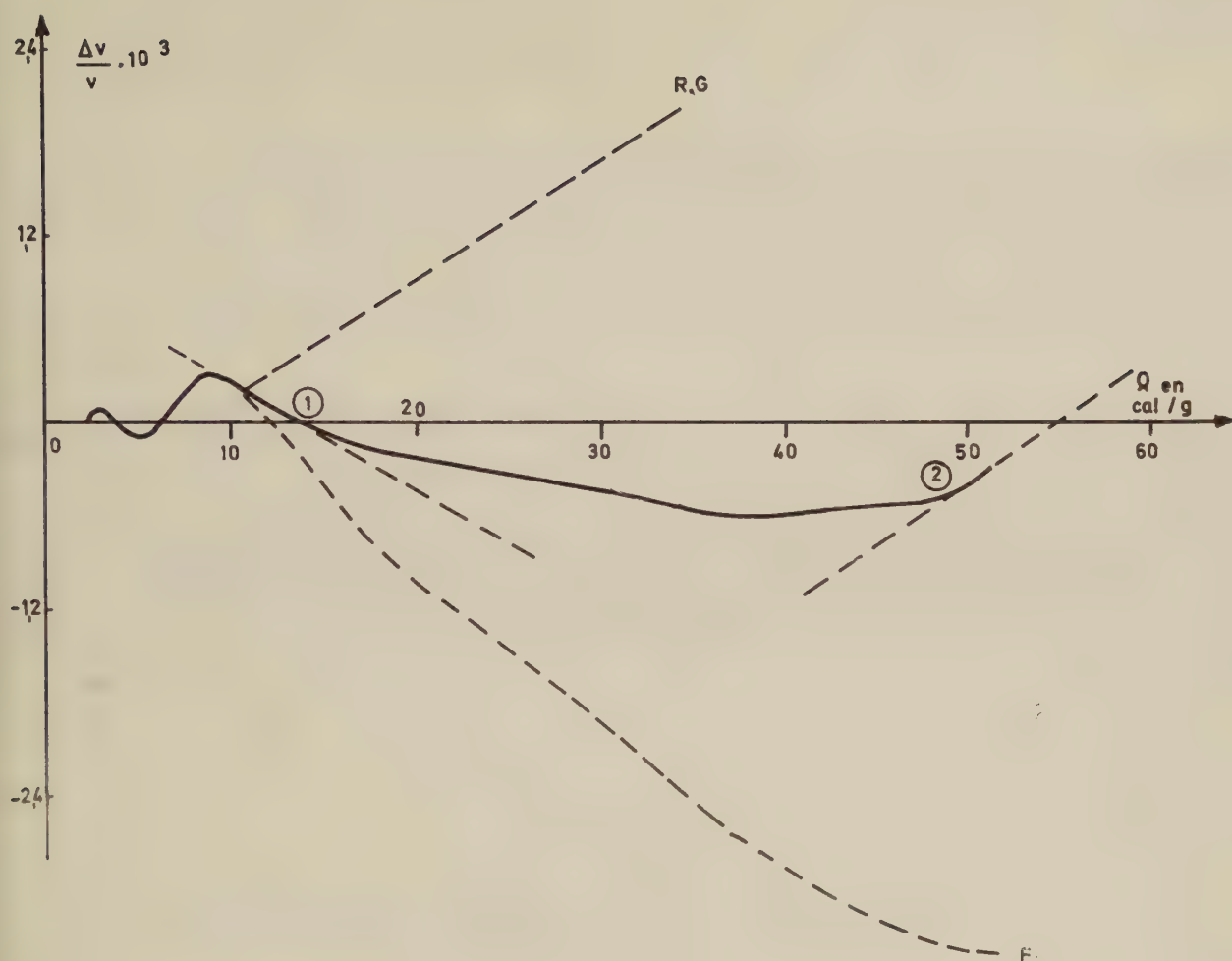


Fig. 45 - Séparation graphique de la déformation des pâtes en «retrait du gel» (R.G.) et «foisonnement» (F.).

Dans les conditions semi-adiabatiques, le gonflement se produit très tôt et très rapidement (Fig. 46). Il est possible qu'il soit pratiquement terminé lorsque commence le second retrait.

La variation de volume, après la vitesse maximale de dégagement de chaleur, serait donc le résultat de deux mécanismes.

- l'un, de retrait, que l'on appellera "retrait du gel"* lié linéairement au dégagement de chaleur : $\frac{d}{dQ} \frac{\Delta V}{V} = a$ (Fig. 47, 48). Pour une même température de la

* Les raisons du choix de ce terme sont données aux par.3.1 et 3.2 du présent chapitre.

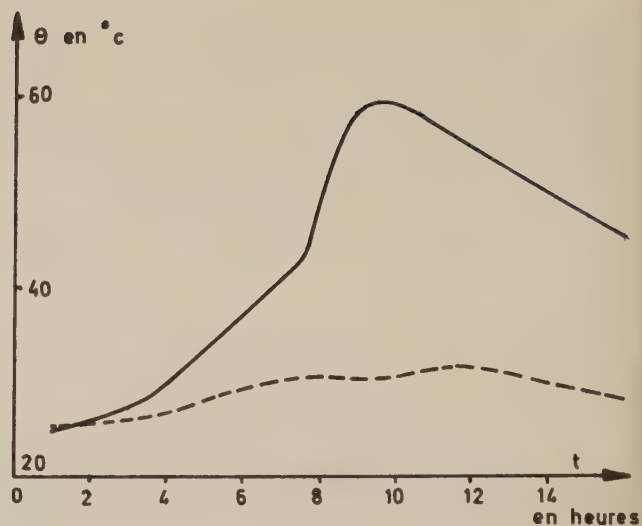
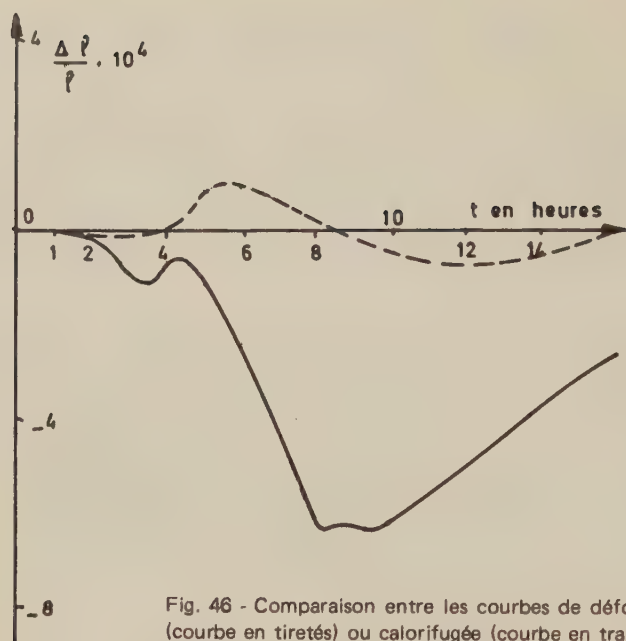


Fig. 46 - Comparaison entre les courbes de déformation d'une même pâte de ciment, non calorifugée (courbe en tiretés) ou calorifugée (courbe en trait plein). Les courbes de température interne des éprouvettes montrent l'effet de la calorifugation (graphique de droite). Le gonflement est beaucoup plus rapide et important pour l'éprouvette calorifugée.

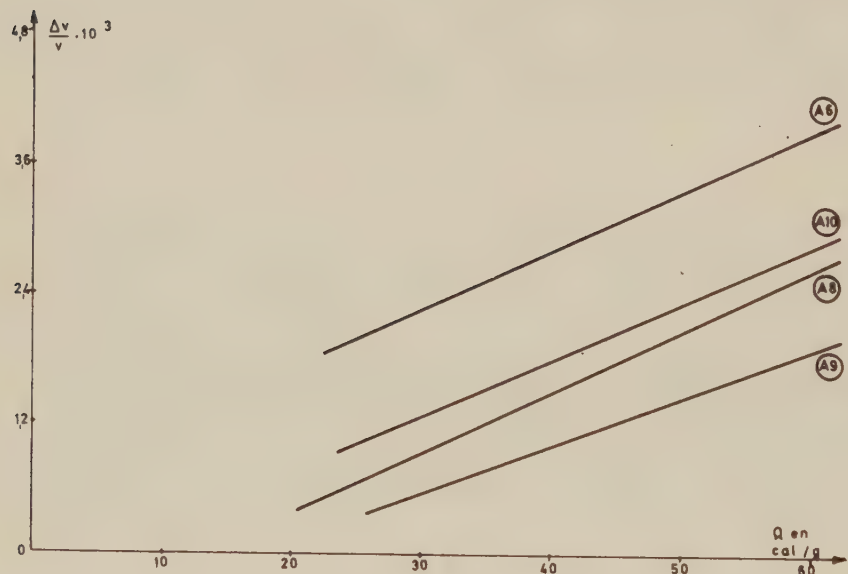


Fig. 47

Fig. 47 et 48 - Retrait de gel, en fonction de la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation. Droites parallèles aux parties ② des courbes des figures 42, et 43, tracées depuis l'origine des parties ① comme indiqué sur la figure 45.

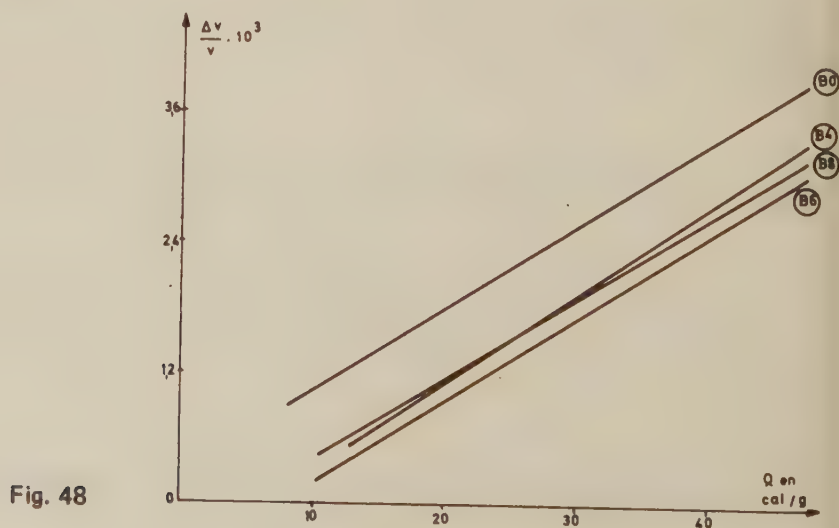


Fig. 48

pâte, la valeur du coefficient serait sensiblement la même pour tous les ciments (comprise entre 0,5 et $0,75 \cdot 10^{-4}$ à 20°C, lorsque le dégagement de chaleur est exprimé en calories par gramme de ciment anhydre). La valeur du coefficient a dépend de la température de la pâte*.

- l'autre, que l'on appellera "foisonnement"*** tendant asymptotiquement vers un gonflement (Fig. 49, 50 et 51), soit par un gonflement continu (cas du ciment B₄), soit par un gonflement suivi d'un retrait lorsque la valeur asymptotique est dépassée (cas du ciment A₁₀). La cinétique du gonflement dépend de la température de la pâte. Dans son ensemble, elle ne paraît pas directement liée au dégagement de chaleur.

Cette interprétation des résultats expérimentaux peut avoir des conséquences, sur le plan pratique - elles seront examinées au Chapitre 6 - et sur le plan théorique, car la séparation en deux mécanismes antagonistes est susceptible, si sa validité est vérifiée, de contribuer à une meilleure compréhension des aspects physiques de l'hydratation. Par exemple, l'effet de la température de la pâte apparaît beaucoup plus important avec cette interprétation que lorsque l'on considère la déformation globale. Une recherche qui comparerait déformation et dégagement de chaleur en isotherme, à différentes températures serait la suite logique - que l'on peut espérer féconde - de ces essais.

2 - DISCONTINUITÉ OBSERVÉE PAR M. DEL CAMPO ET SECOND RETRAIT [15]

Cet auteur a publié, en 1963, les résultats de ses travaux de thèse sur "le retrait intrinsèque de la pâte de ciment". Il note : "dans tous les essais réalisés, la courbe de variation de volume, au bout d'un certain temps, présente un point anguleux, une brusque discontinuité". L'apparition du second retrait présente dans nos essais ce même caractère brusque ; quelquefois, si l'on s'en tient aux résultats bruts des essais (cas des ciments A₆ et A₈, Fig. 42) ; toujours, si l'on admet l'interprétation qui en a été donné. Il convient de vérifier s'il s'agit de deux aspects d'un même phénomène.

* La corrélation de la figure 41 concerne les essais réalisés en semi-adiabatique. La valeur du coefficient a est d'environ $1,06 \cdot 10^{-4}$ (50 fois plus faible qu'en isotherme !). Dans ces essais, les éprouvettes servant aux mesures de dégagement de chaleur étaient toujours à une température supérieure à celle des éprouvettes dont on mesurait les variations de longueur. Pour cette raison, la valeur trouvée pour a, dans ces essais, n'a pas de sens physique ; elle est très sous-estimée. Cependant, il est vraisemblable que a diminue fortement lorsqu'augmente la température à laquelle l'hydratation se produit.

** Les raisons du choix de ce terme sont données aux par.3.1 et 3.2 du présent chapitre.

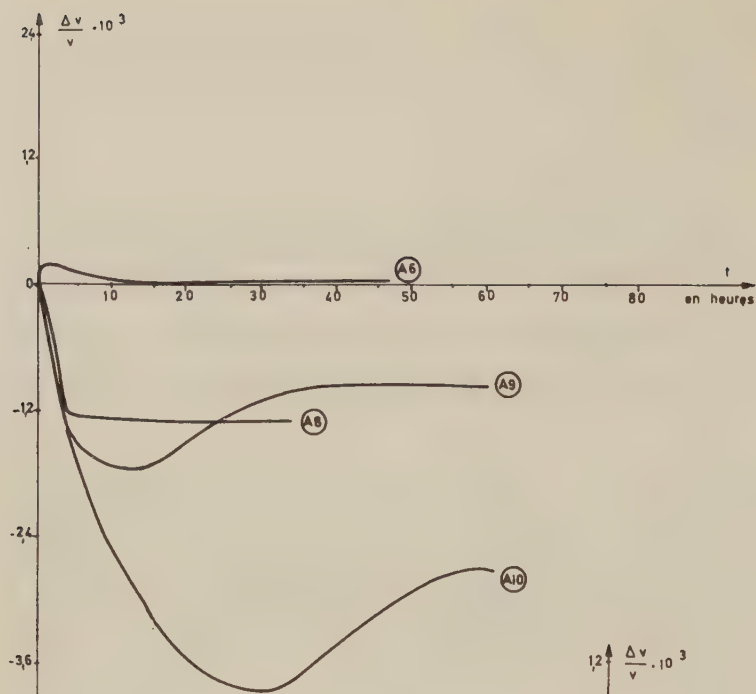


Fig. 49

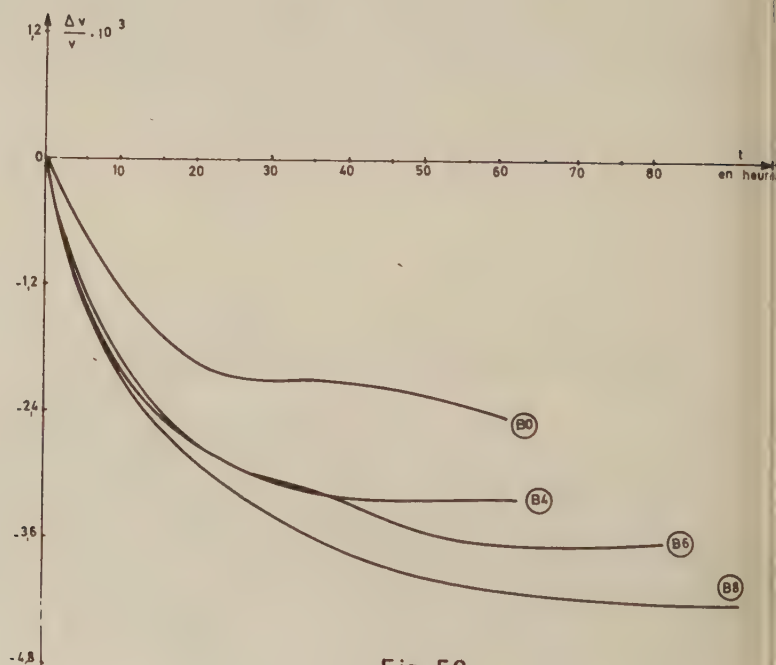


Fig. 50

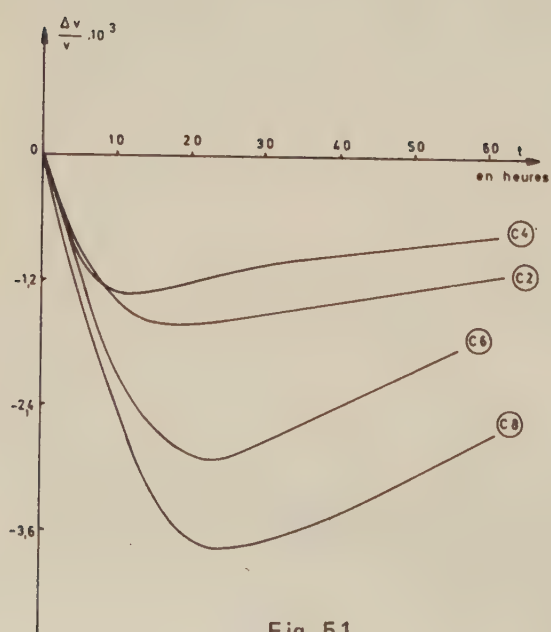


Fig. 51

Fig. 49, 50 et 51 - Évolution du foisonnement en fonction du temps.

Les tangentes à l'origine sont confondues pour les ciments A₈, A₉, A₁₀, B₄, B₆, B₈, C₄, C₈. Les courbes tendent vers une asymptote horizontale. L'anomalie constatée à la fin de la courbe de B₀ peut signifier que, pour ce ciment, la valeur du coefficient α du retrait du gel est inférieure à celle des autres ciments B.

L'appareil utilisé par M. del Campo est un voluménomètre dont l'intéressante particularité est que le liquide manométrique n'est pas directement en contact avec la pâte de ciment*. Les essais ont été réalisés, en général, sur pâte normale dont la température était voisine de 20°C. La Fig. 52 reproduit un exemple des courbes obtenues.

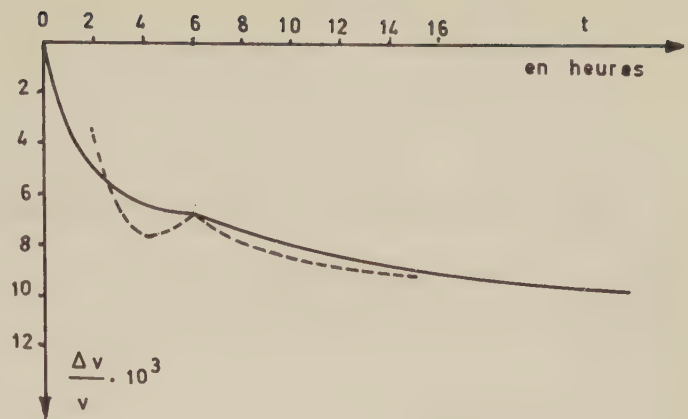


Fig. 52 - Évolution type de la variation de volume d'une pâte de ciment au premier âge, obtenus par M. Del Campo (courbe en trait plein).

On constate l'apparition d'un point anguleux entre 6 et 8 heures. La courbe en pointillés est la courbe moyenne obtenue au chapitre 2 (Fig. 25). Au cours de second retrait l'évolution est semblable à celle trouvée par M. Del Campo.

Contrairement au second retrait, le point singulier n'apparaît pas, en général, après une période de gonflement**. Cette différence provient peut être d'une particularité des ciments étudiés par M. del Campo : pour ces ciments, comme pour A_6 ou A_8 , le foisonnement serait pratiquement terminé au début du retrait du gel.

Les courbes obtenues montreraient donc le second retrait non compensé par le gonflement c'est-à-dire - selon l'interprétation donnée plus haut - proportionnel à la quantité de chaleur dégagée, dès le moment où la vitesse de ce dégagement est maximale. Ce rapprochement paraît compatible avec les principaux résultats trouvés par M. del Campo :

- le point singulier apparaît entre 6 et 12 heures ; c'est également dans cet intervalle que la vitesse de dégagement de chaleur devient maximale ;
- au delà du point singulier, la courbe des déformations en fonction du temps est approximativement une exponentielle décroissante comme la courbe du dégagement de chaleur ;
- lorsque l'on fait varier le dosage en eau de la pâte, le point singulier apparaît approximativement au même âge (du moins lorsque la teneur en C_3A du ciment n'est pas trop forte) ; de même, le moment où la vitesse de dégagement de chaleur est maximale varie peu avec la teneur en eau ;
- le coefficient de l'exponentielle est, pour la courbe de déformation, pratiquement indépendant du dosage en eau ; cette propriété se vérifie sur les courbes de dégagement de chaleur ;
- lorsque la finesse du ciment varie, la déformation asymptote, comptée à partir du point singulier, reste constante ; de même la quantité de chaleur dégagée, au bout d'un temps très long, dépend peu de la finesse de mouture ;
- l'ordre de grandeur des déformations, au-delà du point anguleux est semblable à celui du second retrait dans le cas d'un ciment dont le foisonnement cesse tôt (ciment A du Chapitre 2, semblable à A_8).

* Ce dispositif est donc très différent de celui utilisé par Le Chatelier [20]. Dans ses expériences classiques, la pâte de ciment était en contact avec un excès d'eau.

** Une période de gonflement n'a été constatée que dans un cas : sur une pâte d'un ciment riche en C_3A dont la consistance était inférieure à la normale.

Il paraît donc vraisemblable que le point singulier observé par M. del Campo soit dû à l'apparition du second retrait.

3 - VERS UN APPROFONDISSEMENT DU MECANISME DU SECOND RETRAIT ET DU GONFLEMENT

Dans ce paragraphe, on considère séparément les deux phénomènes qui apparaissent simultanément dans la plupart de nos essais, conformément à l'interprétation donnée au § 1.3.

3.1 - Retrait du gel

Selon les résultats expérimentaux, il est tel que :

$$\frac{d}{dQ} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) = a \quad \text{avec } 0,5 \cdot 10^{-4} \leq a \leq 0,75 \cdot 10^{-4} \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

H. Le Chatelier [20] a montré que, au cours de l'hydratation, le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes primitifs des composants. Selon Powers cette contraction serait de $0,16 \text{ cm}^3$ pour 1 gramme d'eau fixée chimiquement.

Cet effet a été comparé à un départ d'eau et appelé "auto-dessiccation". On conçoit ainsi que l'hydratation provoque un retrait comme le dessèchement. Cependant Czernin [21] souligne, en s'appuyant sur cette comparaison, que ce retrait doit être négligeable.

Nos résultats et ceux de M. del Campo montrent qu'il se produit, au contraire, un retrait important. Il semble donc que l'analogie entre la contraction des volumes absolus et l'auto-dessiccation n'est pas entièrement apte à rendre compte des phénomènes en cause.

Alexander et Wardlow [22], en suivant l'évolution du retrait d'équilibre d'une pâte de ciment en fonction de la perte d'eau, ont mis en évidence un point singulier (Fig. 53) qui séparerait deux phases du dessèchement. Dans ces essais, chaque courbe se rapporte à une pâte de ciment dont l'âge est constant : 7, 28, 90, 180 jours. On constate que leur seconde phase est pratiquement indépendante de l'âge de l'éprouvette.

Ce fait est en bon accord avec les conceptions dues à Powers sur la structure de la pâte de ciment durcie, composée de ciment anhydre, d'un "gel" et d'espaces capillaires. Le "gel", selon la définition donnée par Powers, est "ce matériau hétérogène (produit par l'hydratation) sous sa forme la plus dense". C'est donc un matériau pratiquement identique du début à la fin de l'hydratation, l'accroissement des résistances n'étant dû qu'à l'augmentation de la proportion du volume de pâte de ciment occupé par le gel.



Fig. 53 - Relation entre le dessèchement et le retrait qu'il provoque, pour des pâtes de ciment âgées de 7, 28, 90 et 180 jours. On constate sur ces courbes l'existence d'un point anguleux. La pente de la tangente au point extrême des courbes (eau la plus liée) est la même, quel que soit l'âge de la pâte.

Avec Czernin* on peut donc interpréter la première phase des courbes de la figure 53 comme liée au départ de l'eau capillaire, la seconde, à celui de l'eau du gel.

A perte d'eau égale, le retrait est d'autant plus élevé que le stade de dessiccation est plus avancé :

- pour la première eau partie du gel (immédiatement après le point singulier)
 $\frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta W}{W}$ est égal à $8 \cdot 10^{-3**}$;

- pour l'eau la plus liée physiquement (extrémité des courbes) ce même rapport vaut $80 \cdot 10^{-3}$.

Ces valeurs sont identiques pour les éprouvettes âgées de 180, 90, 28 et 7 jours. Nous supposons qu'elles sont vraies dès qu'il existe une structure continue du gel dans la pâte.

* Cité par del Campo.

** Les éprouvettes étant âgées peuvent être considérées comme approximativement homogènes et isotropes, ce qui autorise à écrire :

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \frac{\Delta l}{l}$$

A partir de résultats expérimentaux donnés par Powers [7] on peut relier linéairement l'auto-dessiccation relative à la quantité de chaleur dégagée par gramme de ciment anhydre*.

$$\frac{\Delta W}{W} = b Q$$

Le coefficient b varie peu suivant la nature du ciment ; il est égal à $0,7 \cdot 10^{-3}$ environ.

Si le retrait du gel est dû à l'auto-dessiccation, on peut, à partir de la relation ci-dessus, calculer la valeur de $\frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta W}{W}$ qui lui correspond :

$$\frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta V}{V} / \Delta Q \cdot \Delta Q / \frac{\Delta W}{W} = \frac{a}{b}$$

donc, puisque d'après nos résultats expérimentaux $0,5 \cdot 10^{-4} \leq a \leq 0,75 \cdot 10^{-4}$

on a : $70 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta W}{W} \leq 107 \cdot 10^{-3}$.

Ce rapport est du même ordre que celui trouvé pour le départ de l'eau la plus liée physiquement. Ce résultat est surprenant car, lorsque le retrait du gel se produit, il reste encore beaucoup d'eau capillaire. Il est possible que la contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique ne soit qu'apparente et résulte de ce qu'on prend l'analogie entre auto-dessiccation et dessiccation comme une description du mécanisme réel en cause.

Si l'on compare le mécanisme du retrait du gel à celui d'un retrait par dessiccation, tout se passe comme si c'était seulement l'eau la plus liée physiquement qui partait.

Puisque les valeurs aussi élevées du rapport $\frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta W}{W}$ paraissent liées au gel, le retrait ne commence que lorsque le gel dans la pâte forme une structure continue. On peut se demander si le début du ralentissement des réactions d'hydratation (maximum de $\frac{dQ}{dt}$) ne correspond pas à la formation de cette structure ? Powers [23] considère comme prouvée "la conservation intacte sans rupture ni déplacement de la couche de gel au cours du processus d'hydratation après la fin de la prise"*** Forrester [24] , a étudié pour chaque valeur de la quantité de chaleur dégagée, la variation de la vitesse de dégagement en fonction de la température de la pâte de ciment. Il distingue un changement dans la cinétique de l'hydratation autour

* Powers indique que $W_n = 2 \cdot 10^{-3} Q$

Dans cette relation, W_n et Q se rapportent au même volume de pâte de ciment. D'après la définition de Q , c'est celui que l'on peut fabriquer avec 1 gramme de ciment. Dans les expériences d'Alexander et Wardlow, pour un gramme de ciment, on ajoute $0,45 \text{ cm}^3$ d'eau ($W = 0,45$). Par conséquent :

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{0,16 W_n}{W} = \frac{0,16 \times 2}{0,45} 10^{-3} Q$$

* Selon cet auteur, la fin de prise conventionnelle coïncide approximativement au maximum de $\frac{dQ}{dt}$

de 20 cal/g. Avant, la courbe de dégagement de chaleur, fonction polynôme, est "en accord avec une réaction contrôlée par la surface du corps en réaction" ; ensuite, fonction exponentielle, elle évoque un processus de diffusion contrôlée, "peut-être la diffusion de l'eau à travers une couche plus épaisse de produit (hydraté) entourant le grain de ciment".

3.2 - Foisonnement

Steinour* a constaté "qu'un échantillon de pâte commence à gonfler dès la fin de la période dormante** et qu'une expansion relativement rapide se produit pendant la prise". Il indique depuis la prise et jusqu'à 24 heures; une vitesse horaire d'expansion relative moyenne de 10^{-4} . F.-S. Fulton [25] confirme cet ordre de grandeur. La vitesse d'augmentation du foisonnement trouvée ici est du même ordre mais cependant plus forte : $1,7 \cdot 10^{-4}$ (peut-être parce que les clinkers A et B ont une teneur assez forte en chaux libre et C, en magnésie).

H. Lafuma [26] relie ce phénomène d'expansion aux réactions d'hydratation qui se produisent sans dissolution préalable, comme par exemple celle de la chaux vive ou encore celle entre le gypse et l'aluminate tricalcique.

Ces réactions provoquent une pulvérisation de l'hydrate formé due à l'augmentation du volume absolu des phases solides. L'eau s'intercale alors probablement entre les grains de façon à ce que les forces de tension superficielle équilibrent celles de Van der Waals et provoquent un foisonnement. L'étude faite en annexe de l'influence du gypse montre, à l'appui, que plus le dosage en gypse est élevé, plus le foisonnement est grand.

Cette théorie ne peut pas être confrontée quantitativement avec les résultats expérimentaux pour les raisons suivantes :

- on ne peut pas faire la part, des quantités de chaleur dégagées avec ou sans dissolution préalable (ce serait éventuellement possible à partir de travaux comme ceux de Forrester [24]) ;
- une partie des hydrates formés sans dissolution préalable se loge dans les espaces capillaires et ne provoque pas de foisonnement de la pâte.

A titre indicatif, si l'on admet que :

- 1 cm^3 de C_3A forme 3 cm^3 de sulfo-aluminate (ces ordres de grandeur sont ceux de la transformation de la chaux vive en chaux éteinte) ;
- le poids spécifique de C_3A est de 3 g/cm^3 ; sa chaleur d'hydratation de 207 calories/gramme (selon Bogue).

* Cité par Powers dans [23]. Dans ces essais, les éprouvettes sont vraisemblablement conservées sous l'eau.

** La période dormante dure de 1 à 2 heures entre la fin du malaxage et le début de prise. La vitesse du dégagement de chaleur d'hydratation est alors très faible.

Le foisonnement serait :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2}{0,6 \times 207 \times 3} \times \alpha \times Q_{SD} = 0,5 \alpha Q_{SD} \%$$

où Q_{SD} désigne la quantité de chaleur dégagée par la réaction sans dissolution par gramme de ciment anhydre et α la proportion des hydrates formés provoquant effectivement le foisonnement.

Au début du tracé des courbes des figures 49, 50 et 51, on obtient expérimentalement :

$$\frac{\Delta V}{V} = 0,12 Q \%$$

La concordance entre la théorie et l'expérience, sans être assurée, est plausible.

La diminution du foisonnement qui, suivant notre interprétation, se manifeste pour les ciments A_9 A_{10} et ceux du clinker C, ne semble pas pouvoir être interprétée suivant cette théorie et, par ailleurs, il reste à concevoir comment le foisonnement et le retrait du gel peuvent se produire simultanément.

TABLEAU V
PHENOMENES INDEPENDANTS QUI INTERVIENNENT
POUR CHAQUE PERIODE DE LA DEFORMATION D'UNE PATE DE CIMENT

Phénomènes indépendants \ Période de la déformation d'une pâte	Premier retrait	Gonflement	second retrait
Retrait capillaire	Influence dominante	Influence négligeable, les contraintes sont toujours du même ordre mais la rigidité du matériau a considérablement augmenté	
Foisonnement	Influence très importante	Influence dominante	Influence importante au début qui s'affaiblit puis s'annule avec la fin des réactions sans dissolution préalable
Retrait du gel	Influence nulle. La structure continue du gel n'est pas encore formée		Influence dominante

Formation de la structure continue du gel

Fin de prise conventionnelle et maximum de dQ/dt

4 - ESSAI DE SYNTHÈSE

Les déformations observées de la pâte de ciment, premier retrait, gonflement, second retrait, apparaissent, à l'issue de cette étude, comme le résultat de trois phénomènes indépendants : le retrait capillaire, le foisonnement, le retrait du gel. Il paraît approprié de se représenter ces trois phénomènes agissant dès le début et au cours des trois périodes (Tableau V). Bien qu'on ne connaisse pas l'origine exacte du retrait du gel, il est vraisemblable qu'il se produit immédiatement dans les premiers amas de gel formés ; son effet sur la déformation de la pâte reste nul tant que ces amas de gel sont isolés ; il ne se manifeste que lorsqu'une structure continue "charpente" la pâte de ciment ce qui pourrait être un repère de "fin de prise".

Le retrait du gel est produit par l'hydratation considérée globalement ; le foisonnement, par contre, ne résulte que des réactions sans dissolution préalable.

Lorsque la structure continue du gel est formée, le foisonnement ne peut affecter la pâte de ciment qu'en brisant cette structure mais on peut penser qu'en foisonnant les hydrates la rescellent, en général, aussitôt. Dans le cas des ciments A_9 , A_{10} et ceux du clinker C, la diminution rapide du foisonnement résulterait de fissures produites par un foisonnement excessif, refermées ensuite par le retrait du gel.

Annexe au chapitre 4

INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENTS SUR LA DÉFORMATION DES PÂTES

La déformation de la pâte, au premier âge, est liée à l'hydratation du ciment et, par conséquent, à sa composition chimique. Il ne semble pas cependant qu'il puisse exister une relation bien définie car la déformation est un phénomène dynamique et la composition chimique, par contre, suppose un état d'équilibre ; d'autres facteurs peuvent intervenir dans la cinétique des réactions, comme, par exemple pour chaque constituant, la proportion sous forme cristalline, la granulométrie ou, pour les grains de ciment composites, la situation en surface ou à l'intérieur du grain, etc... Tout au plus, certaines tendances peuvent se manifester.

Sur les tableaux VI et VII sont indiquées la composition chimique [10] des clinkers A, B et C et leur composition potentielle calculée suivant les formules de Bogue. Le gypse ajouté à ces clinkers est pratiquement pur. Comme dans le chapitre précédent, chaque ciment est désigné par une lettre suivie d'un chiffre ; la lettre indique le clinker utilisé et le chiffre le pourcentage de gypse dans le ciment (Cf. Chapitre 4 § 1.2).

Si, sur les figures 54, 55, 56, on considère l'évolution, en fonction du temps, de la vitesse de dégagement de chaleur, on constate une grande analogie entre les courbes des ciments B₄, B₆, B₈ et C₆ et C₈. Suivant l'interprétation donnée par Lerch [17] ces courbes correspondent à l'hydratation du ciment sans l'intervention de l'aluminate tricalcique, soit qu'il n'existe pas, soit que son hydratation soit "bloquée" par la présence du gypse. A l'opposé, les vitesses maximales de dégagement de chaleur plus élevées des ciments A et C₂, C₄, correspondraient au "pic" de l'aluminate.

On peut étudier l'influence de la composition chimique des ciments sur la déformation des pâtes de deux façons différentes, suivant que l'on adopte ou non l'interprétation des résultats données au chapitre précédent (§ 3).

Dans le second cas, les différences entre les ciments sont difficilement explicables comme, par exemple, le changement brusque de comportement entre A₈ et A₉ (Tableau VIII et Fig. 54).

Dans le premier cas, l'analyse distingue le "retrait du gel" et le "foisonnement".

Le retrait du gel, lié à la vitesse de dégagement de chaleur, est semblable pour les ciments B₄, B₆, B₈, C₆ et C₈.

TABLEAU VI
RÉSULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE DES CLINKERS (%)

CONSTITUANTS	CLINKER A	CLINKER B	CLINKER C
Résidu insoluble	0,46	0,15	0,44
Silice soluble	21,30	21,52	22,00
Alumine	6,43	3,74	4,44
Oxyde de fer	2,62	5,11	1,56
Oxyde de titane	0,32	0,22	0,24
Oxyde de manganèse	0,08 env.	0,09	0,04
Oxyde de calcium	64,45	65,38	63,24
Oxyde de magnésium	1,11	0,80	2,54
Oxyde de sodium	0,28	0,10	0,39
Oxyde de potassium	1,40	0,55	1,22
Anhydride sulfurique	0,71	néant	1,35
Perte au feu (1050°)	0,94	2,24	2,40
TOTAL :	100,10	99,90	99,86
Chaux libre	1,93	1,39	0,77

TABLEAU VII
COMPOSITION POTENTIELLE SELON BOGUE (%) [11]

CLINKERS	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CARB.
A	43,53	28,22	12,60	7,96	1,00
B	61,56	15,25	1,28	15,52	1,34
C	52,92	23,15	9,12	4,74	0,98

Le foisonnement (Fig. 49, 50 et 51) augmente avec le dosage en gypse (à une inversion près : C₂, C₄). Immédiatement après le début du retrait du gel la vitesse d'augmentation du foisonnement est approximativement la même pour les ciments A et B (B₀ excepté) : $3,6 \cdot 10^{-4}$; elle est un peu plus faible pour les ciments C : $2,5 \cdot 10^{-4}$ (Tableau VIII). Pour les ciments du clinker A, on constate, suivant la teneur en gypse, deux comportements très différents : pour A₆ et A₈ le foisonnement augmente régulièrement jusqu'à une valeur asymptotique ; pour A₉ et A₁₀, le foisonnement devient maximal puis diminue ensuite jusqu'à la valeur asymptotique. Il en est, peut être, de même pour les ciments du clinker B ; le changement survient

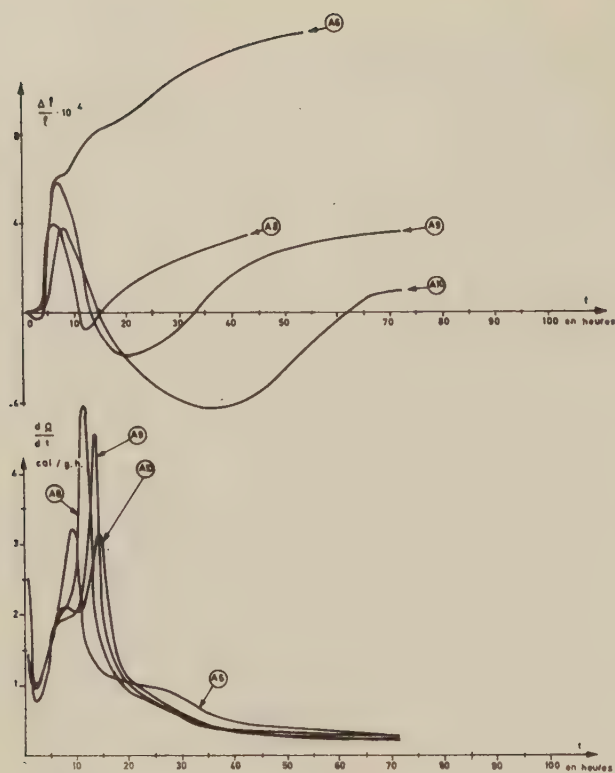


Fig. 54

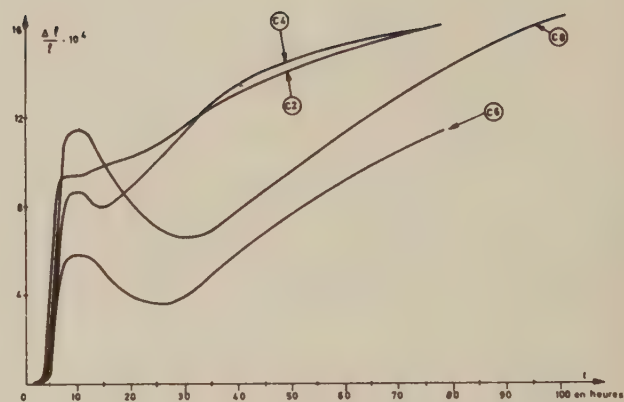


Fig. 56

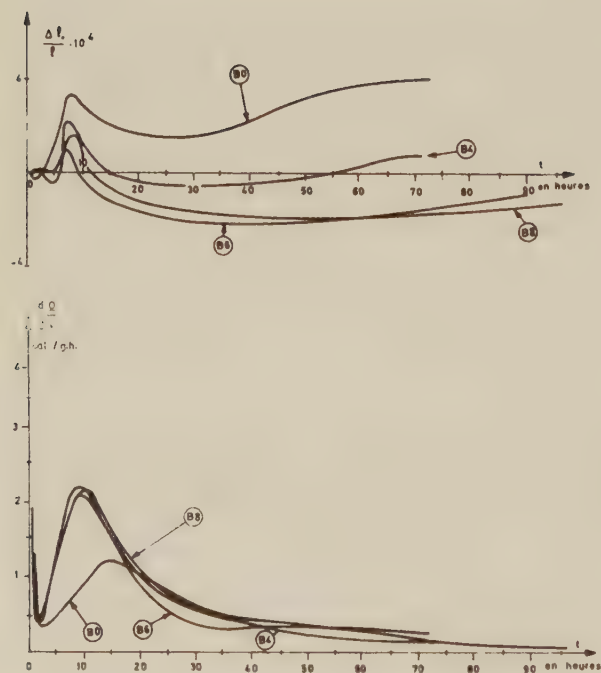


Fig. 55

Fig. 54, 55 et 56 - Évolution, en fonction du temps, de la déformation des pâtes de ciment (graphique supérieur), de la vitesse de dégagement de chaleur d'hydratation (graphique inférieur). Chaque figure concerne les ciments d'un même clinker (A, B ou C) avec différents dosages en gypse (indiqué en %, par le chiffre qui suit la lettre symbolisant le clinker).

entre B₄ et B₆ mais, dans ce cas, la diminution de foisonnement est très faible. Pour tous les ciments du clinker C, le foisonnement passe par une valeur maximale ; cette particularité est peut être due à une teneur relativement élevée en oxyde de magnésium dans le clinker C (2,54 %)*.

TABLEAU VIII
VITESSES MAXIMALES DE DÉFORMATIONS

VITESSE MAXIMALE DE :		CLINKER A				CLINKER B				CLINKER C			
	Unités	A6	A8	A9	A10	B0	B4	B6	B8	C2	C4	C6	C8
gonflement	$\frac{\Delta l}{l} h^{-1} 10^4$	0	1,2	1,5	0,6	0,25	0,45	0,7	0,8	0	0,3	0,3	0,4
second retrait	"	0,55	0,55	0,25	0,24	0,10	0,08	0,04	0,03	0,18	0,25	0,22	0,17
foisonnement (augmentation)	$\frac{\Delta V}{V} h^{-1} 10^4$		3,6	3,6	3,6	1,4	3,6	3,6	3,6	2,5	3	2,5	3
foisonnement (diminution)	"			0,5	0,5			0,1		0,2	0,5	0,5	0,5
dégagement de chaleur	Cal/g.h	3,2	5	4,6	3,1	1,2	2,2	2,2	2,2	3	2,5	2,1	2,2
retrait du gel	$\frac{\Delta V}{V} h^{-1} 10^4$	1,7	2,8	2,1	1,7	0,9	1,75	1,65	1,65				
$\frac{d}{dQ} \frac{\Delta V}{V}$	(Cal/g) ⁻¹ 10 ⁴	0,54	0,56	0,46	0,54	0,75	0,80	0,75	0,75				

Lerch [17] a montré que, pour chaque clinker, il existait un dosage en gypse optimal pour lequel les résistances mécaniques des mortiers étaient maximales, les retraits et gonflements à long terme, minimaux. Il a fourni une formule qui permet de déterminer ce dosage.

$$|SO_3| = 0,0933 |C_3A| + 1,7105 |Na_2O| + 0,9406 |K_2O|$$

Cette équation relie les pourcentages des constituants dont le symbole est entre barres verticales.

Les figures 57, 58, 59 et 60 montrent comment cette propriété se vérifie dans le cas de nos essais. Le comportement des ciments du clinker C est anormal, en raison peut être de la particularité signalée plus haut. Pour les clinkers A et B, les dosages optimaux de gypse donnés par Lerch (respectivement 9 et 4,5 %) sont voisins de la limite au-delà de laquelle le foisonnement passe par une valeur maximale avant de diminuer.

* Cette teneur est cependant inférieure à la limite de 5% fixée par la norme NF P 15 302 pour les C.P.A. Il est connu que la magnésie libre, sous forme de périclase provoque des gonflements par un mécanisme analogue à celui de la chaux libre.

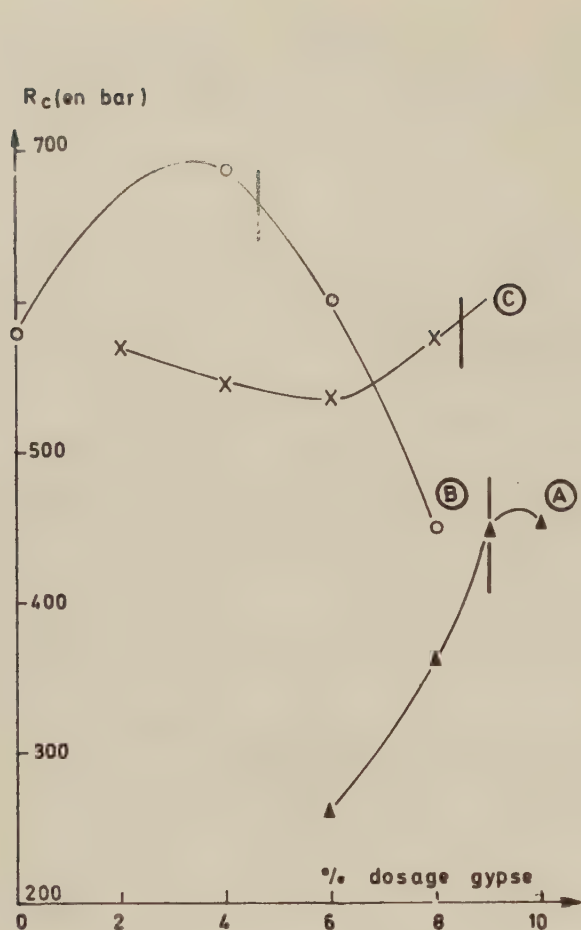


Fig. 57

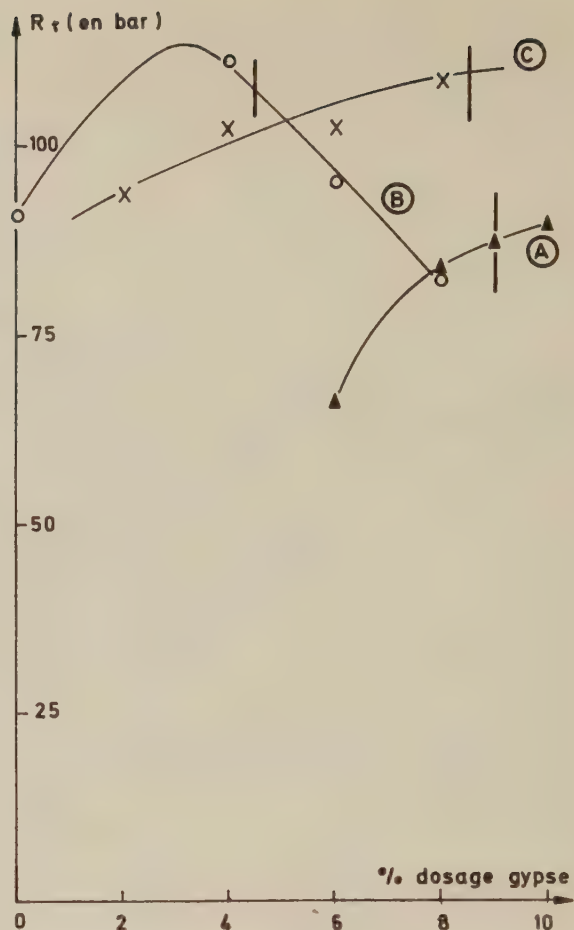


Fig. 58

Fig. 57, 58, 59 et 60 - Variation, en fonction du dosage en gypse, de la résistance à la compression (Fig. 57), à la traction (Fig. 58), du retrait (Fig. 59) et du gonflement (Fig. 60) d'éprouvettes de mortier normal.

Les essais ont été réalisés suivant les normes NF P 15 433 et 451. Chaque courbe est repérée par la lettre du clinker correspondant. Les traits verticaux interceptant les courbes indiquent le dosage optimal en gypse, calculé par la formule de Lerch. On remarque que l'effet du gypse sur le clinker C est opposé à celui observé en général par Lerch.

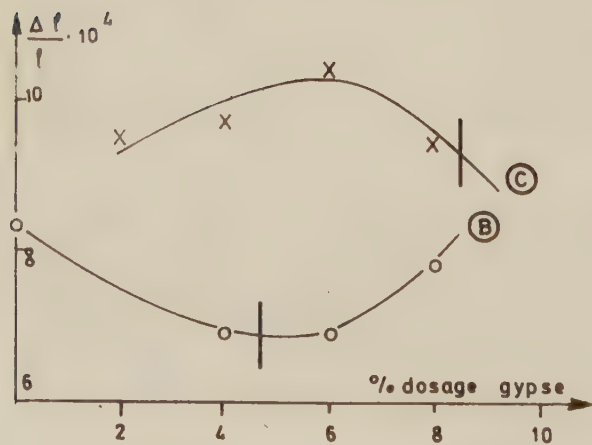


Fig. 59

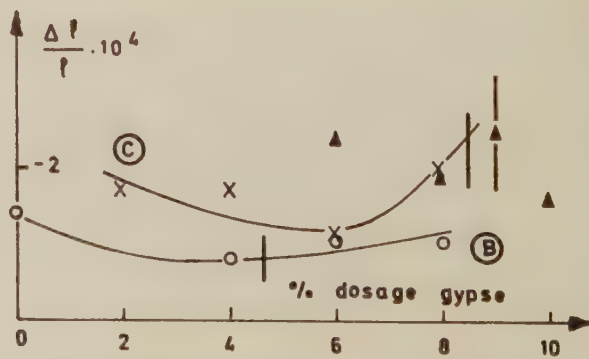


Fig. 60

En Conclusion :

- au pic de dégagement de chaleur, caractéristique du C_3A , correspond une vitesse maximale de retrait du gel anormalement élevée ;
- l'augmentation du dosage en gypse "normalise" le retrait du gel (comme, d'ailleurs, le dégagement de chaleur) ; il le diminue pour les ciments A et C, il l'augmente pour les ciments B (entre B_0 et B_4) ;
- il existe un dosage limite en gypse au-delà duquel la diminution du foisonnement s'ajoute au retrait du gel ; ce dosage limite est voisin (peut être légèrement inférieur) du dosage optimal préconisé par Lerch. Il peut être nul pour certains C.P.A. dont le clinker est analogue à C, du fait probablement d'un dosage trop élevé en constituants tels que l'oxyde de magnésium.

**UN TYPE DE FISSURATION DES REVETEMENTS EN BÉTON HYDRAULIQUE NON ARMÉ ;
FISSURATION PAR HYDRATATION LOCALEMENT DIFFÉRÉE
(FISSURATION H.L.D.)**

1 - JOINTS NEUTRES, JOINTS ACTIFS, FISSURES, DANS UN REVÊTEMENT EN BÉTON HYDRAULIQUE NON ARMÉ.

Un revêtement continu de grande longueur en béton hydraulique non armé se rompt au bout d'un certain temps. On tend à maîtriser cette dislocation, actuellement inévitable, en la localisant au droit des "joints de retrait-flexion", par réduction de la section du revêtement.

La fente (joint), pratiquée dans le béton frais ou durci doit, en principe, être l'amorce d'une rupture. Le joint est dit actif ou neutre suivant que cette rupture s'est, ou non, produite (Fig. 61).

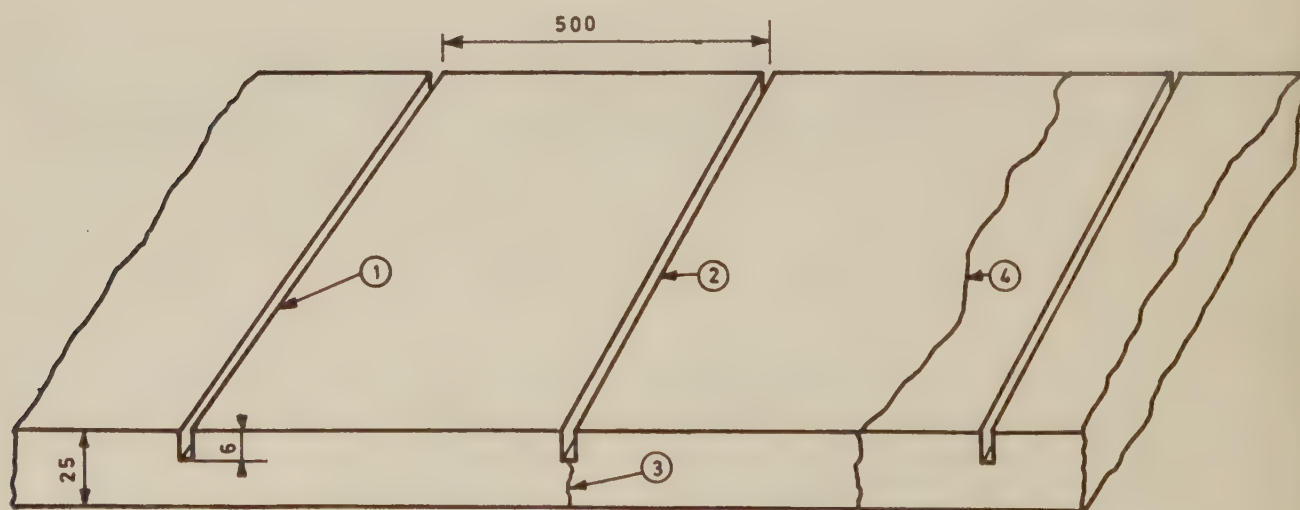


Fig. 61 - Vue cavalière d'un tronçon de revêtement en béton hydraulique non armé

- ① joint neutre,
- ② joint actif,
- ③ rupture du joint,
- ④ fissure transversale complète.

Les dimensions, en centimètres, sont indicatives.

Dans ce chapitre, nous réserverons le terme "fissure" à la rupture non contrôlée, en pleine dalle, par opposition à la "rupture de joint", provoquée.

La fissuration peut se produire :

- avant la réalisation des joints : lorsqu'ils doivent être réalisés par sciage, il faut attendre, pour scier, que le béton ait acquis une résistance suffisante. Il peut alors se fissurer avant de pouvoir être scié sans épaufrures ;
- après la réalisation des joints: au droit d'un joint, la section du revêtement est réduite de 20 à 25 % et les contraintes sont augmentées d'autant. Cependant la rupture ne sera pas localisée en une telle section s'il existe, par ailleurs, des hétérogénéités susceptibles de créer des contraintes plus dangereuses.

Ces fissures apparaissent, en général, avant que le revêtement ne soit ouvert au trafic et, le plus souvent, au cours des premiers jours qui suivent la mise en place du béton ; elles seront appelées "fissures spontanées" puisqu'elles se manifestent sans cause extérieure apparente (charges mécaniques).

La fissuration spontanée, fréquente sur certains revêtements, présente cependant, toujours, un caractère accidentel.

2 - ESQUISSE D'UN PROGRAMME DE CONSTATATION

La construction d'un revêtement en béton hydraulique peut être divisée en 4 étapes :

- approvisionnement des constituants,
- fabrication du béton,
- transport et mise en place du béton,
- finition et évolution du revêtement.

Sur les tableaux IX à XII on a illustré chacune de ces étapes, signalé leurs caractères marquants et indiqué les principaux essais à réaliser ou paramètres à contrôler.

Ce programme de contrôle (ou, plus largement, de constatations) nécessite, pour être exécuté, des moyens financiers importants. L'Administration des Ponts et Chaussées a réuni ces moyens à l'occasion d'une plus vaste entreprise. Il s'agissait de fonder, sur des données concrètes, la révision du fascicule 28 du "Cahier des Prescriptions Communes" : "Construction des chaussées en béton" [27] .

TABLEAU IX

APPROVISIONNEMENT DES CONSTITUANTS

Caractère marquant :

— Utilisation systématique de plastifiant et d'entraîneur d'air.

Essais réalisés sur le ciment avant son emploi

mesure ou détermination de :	numéro de la norme NF (si elle existe)	fréquence de l'opération par jour de chantier
la température du ciment (au moment de la livraison)		6 à 8
du temps de prise	P. 15 431	2
de l'expansion à chaud	P. 15 432	2
de la fissurabilité	P. 15 434	1
de la finesse Blaine	P. 15 353	2
résistance à la flexion sion de prismes de mortier normal (à 7 et 28 jours).	P. 15 451	

Essais réalisés sur l'eau, le plastifiant et l'entraîneur d'air

— Analyse ou identification avant le début du chantier.

Essais réalisés sur les granulats avant leur emploi

mesure ou détermination de :	mode opératoire Ponts et Chaussées *	
la granulométrie	G.2 - 1970	Ces mesures ont été faites au cours de l'approvisionnement avant le début de la construction du revêtement
l'équivalent de sable	G.6 - 1970	
la résistance à l'abrasion (essai Deval ou Los Angeles)	G.16 - 1970 G.18 - 1970	
la propreté		

* Modes opératoires : «Analyse granulométrique par tamisage», «Essai d'équivalent de sable», «Essai Deval sec et humide», «Essai Los Angeles», édités par DUNOD, 92 rue Bonaparte, Paris 6e.

TABLEAU X

FABRICATION DU BETON

Caractère marquant :

- fabrication en centrale fixe.

Facteurs enregistrés au cours de la fabrication du béton

- Poids des constituants (estimation des vitesses de remplissages et de vidange des trémies peseuses).
- Présence d'adjuvants (plastifiant ou entraîneur d'air).
- Présence d'eau ajoutée volontairement hors du circuit de pesée.
- Puissance nécessaire pour le malaxage et durée du malaxage.

Facteurs enregistrés sur les constituants, juste avant leur introduction dans le malaxeur

- Température de l'eau et du ciment.
- Humidité du sable.

Essais réalisés sur le béton dès la sortie du malaxeur

mesure ou détermination de :	numéro de la norme	fréquence de l'opération rapportée au nombre de gâchées
— la teneur en air occlus	projet de M.O L.C.P.C. P. 18 451	1/25
— la maniabilité		1/25
— l'affaïssement au cône		1/25
— la teneur en eau		

Essais réalisés ultérieurement sur le béton prélevé à la sortie du malaxeur

mesure ou détermination de :	numéro de la norme	fréquence de l'opération rapportée au nombre de gâchées
— la résistance à la flexion à 7 et 28 jours	P. 18 407	1/150
— la résistance au fendage (essai Brésilien) à 7 et 28 jours	P. 18 408	1/150

TABLEAU XI

TRANSPORT ET MISE EN PLACE DU BETON

Caractères marquants :

- Transport du béton en camion-benne sur une distance éventuellement assez longue (10 km).
- Mise en place du béton par coffrages glissants.
- Le revêtement ne comporte aucune armature.

Facteurs notés sur le transport du béton

- Distance
- Durée
- Climat (température, hygrométrie, vitesse du vent, précipitation)*

* Ces facteurs sont enregistrés en plusieurs emplacements sur le chantier.

Facteurs enregistrés au cours de la mise en place du béton

- Vitesse d'avance de la machine à coffrage glissant.
- Intensité électrique de l'alimentation des pervibrateurs.

TABLEAU XII

FINITION ET EVOLUTION DU REVETEMENT

Caractères marquants :

- Utilisation de produits de cure très efficace (les pertes en eau interne du béton sont réduites de 95%)
- Réalisation des joints de retrait-flexion par diminution de la section du revêtement)
- Ces joints ne comportent ni goujons, ni fers de liaison pour le transfert des charges.

Facteurs notés sur la finition du revêtementsur le répandage du produit de cure :

- surface de revêtement recouverte avec 100 litres de produit.

sur le sciage des joints *

- durée entre le début du sciage et la fin de la mise en place du béton.
- vitesse d'avance de la scie.

* Le plus souvent, et, en particulier sur le chantier que nous avons le plus observé, les joints sont sciés dans le béton durci. Sur certains chantiers, cependant, les joints peuvent être moulés dans le béton frais.

Facteurs notés ou enregistrés de l'évolution du revêtement

- Température interne du béton (enregistrée à plusieurs niveaux dans l'épaisseur du revêtement).
- Climat ambiant (température, hygrométrie, vitesse du vent, évaporation, précipitation).
- Durée entre la fin du sciage et l'ouverture du joint.
- Date de première apparition et localisation des fissures.

3 - ASPECTS METHODIQUES DES CONSTATATIONS

Une fissure (ou un ensemble de fissures) peut être considérée comme le signe d'une différence, au moment de la fissuration, entre la partie fissurée et les parties saines du revêtement.

Si, à partir de cette évidence, on souhaite établir les bases d'une recherche systématique des différences entre parties fissurées et saines, on relève deux difficultés : d'abord, le moment de la fissuration n'est jamais connu et ne peut être confondu avec celui de la découverte de la fissure ; ensuite, la recherche d'une différence suppose la définition préalable de la grandeur des parties de revêtement comparées.

3.1 - Observation et "observation réciproque"

Les fissures nouvelles apparaissent souvent après la pluie car l'eau qui les a imbibées s'évapore en dernier. On peut être tenté d'en déduire que c'est la pluie qui a créé la fissuration, d'autant que cette déduction peut être étayée par un raisonnement. Souvent, en effet, la pluie provoque un refroidissement brutal de la surface de la dalle, créant ainsi des contraintes de traction locales parfois importantes. On peut justifier, par le calcul, que la pluie est la cause des fissures mais, pour l'affirmer en tant que fait observé, il est au moins nécessaire de rechercher "l'observation réciproque" : est-ce que la fissuration est apparue avec la même densité partout où une telle pluie est tombée ?

Comme il est certainement peu fréquent que la fissuration ne résulte que d'une seule anomalie, "l'observation réciproque" peut présenter bien des exceptions, même dans le cas où l'anomalie est partiellement déterminante ; cependant, il est vraisemblable que, moins ces exceptions sont nombreuses, plus le rôle de l'anomalie observée risque d'être important dans le processus de fissuration.

L'adoption de cette règle de classement entre les anomalies permet d'examiner toutes celles qui surviennent depuis l'approvisionnement des constituants du béton jusqu'à l'apparition des fissures, sans accorder à priori une importance particulière aux circonstances précises de l'apparition.

3.2 - Cohérence des observations pour toute échelle de comparaison

La comparaison sera faite entre les parties de revêtement saines et fissurées construites chacune :

- en un seul chantier,
- en une seule journée,
- en une seule gâchée.

Les termes de la comparaison sont très différents selon la grandeur des parties comparées. D'une échelle à l'autre, les observations sont indépendantes et leur interprétation finale doit assurer la cohérence de l'ensemble.

4 - CONSTATATIONS

4.1 - Comparaison entre les chantiers

Au cours de la même année, sur cinq chantiers ouverts sous des climats globalement semblables, on a mis en oeuvre des moyens de constructions peu différents. Des revêtements construits, certains furent très fissurés, d'autres peu. Entre eux, la principale différence est dans le choix des constituants du béton (Tableau XIII) :

- nature des granulats,
- composition minéralogique du ciment.

TABLEAU XIII
COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS CHANTIERS

Désignation des chantiers	a	d	f	e	g
Nature des cailloux et gravillons	Silico-calcaire		Calcaire		
Teneur en aluminat tricalcique cristallisé du ciment (analyse par diffractométrie de rayon X)	6,8	2,3	4,1		traces
Nombre de fissures traversant entièrement la dalle, pour 10 km de revêtement	24	4	5	10	0

Une seule caractéristique de cette composition est indiquée sur le tableau : la teneur en aluminat tricalcique cristallisé, mesurée par diffraction des rayons X, exprimée en %.

Cette comparaison montre que, vraisemblablement, la nature des constituants du béton influe sur le risque de fissuration des revêtements exprimé ici, a posteriori, par le nombre de fissures transversales complètes pour 10 Km de piste.

La comparaison entre les chantiers a et d est particulièrement intéressante. Leurs sites étaient contigus, leurs exécutions, simultanées. Leurs granulats à béton étaient aussi très semblables puisque les cailloux de l'un provenait de la carrière ou l'autre prenait ses gravillons (et réciproquement). Leur différence principale provient donc de la nature du ciment.

4.2 - Comparaison entre les journées

Il arrive que, sur un même chantier, certaines journées de production soient plus défavorables que d'autres quant à la fissuration.

Les facteurs caractérisant une journée sont nombreux et concernent les conditions météorologiques, la fabrication du béton et du revêtement, l'évolution du revêtement.

On se propose de comparer les journées de fabrication du chantier a, chantier où les fissures furent nombreuses, à partir des indications du tableau XIV.

Les éléments de comparaison donnés sur ce tableau sont volontairement qualitatifs. Les chiffres seraient ici trompeurs puisque la pondération de l'influence des facteurs sur la fissuration est inconnue ; en outre, pour l'un de ces facteurs, non des moins importants (la régularité de la fabrication en centrale) l'information est essentiellement qualitative.

Chaque colonne du tableau XIV se réfère à une journée dont la date est inscrite en tête.

Chaque ligne du tableau se rapporte à un facteur susceptible de caractériser globalement une journée.

Pour chacun de ces facteurs on a réalisé un classement entre les journées en repérant par ****, celles pour lesquelles ce facteur présentait une valeur qui pouvait être jugée, par rapport aux valeurs prises les autres jours, comme la plus défavorable a priori pour le risque de fissuration. Sur la ligne évaporation, par exemple, au droit de la journée du 13-9 le signe **** indique que, de toutes les journées de production du chantier a, c'est pour celle-ci que l'évaporation a été la plus forte. La journée du 26-8 qui, du point de vue de l'hygrométrie, vient juste après est marquée par le signe ***. Pour tous les facteurs étudiés, le classement est ainsi fait de la journée qui est en troisième position (**) puis en quatrième (*) . Au-delà on a considéré que le facteur présente une valeur banale et n'a pas à être pris en compte dans la comparaison.

Tous les facteurs étudiés sur le tableau XIV sont chiffrables à l'exception de celui qui doit caractériser les irrégularités de fabrication du béton en "centrale". Dans ce cas, la comparaison est faite a posteriori, d'après l'enregistrement des variations de la puissance consommée par l'un des moteurs qui entraîne le malaxeur*. Sur un enregistrement de ce type on peut mesurer la durée du malaxage et des intervalles entre malaxage, mais on peut également repérer : les périodes où la centrale est en marche manuelle, les erreurs de dosage et les arrivées tardives ou par saccades de constituants. Il a été demandé à plusieurs personnes, entraînées à cette lecture, de comparer les enregistrements journaliers, exposés côte à côte devant elles comme sur la figure 62, et de désigner, en les classant les quatre plus irréguliers. Ceux du 29 Août et du 6 Septembre furent classés en tête.

* L'appareil utilisé pour cet enregistrement est le « wattmètre différentiel » : son emploi est maintenant généralisé sur les centrales à béton importantes. Il a été mis au point par Delude et Ambrosino [28] au L.R. des Ponts et Chaussées de Bordeaux.

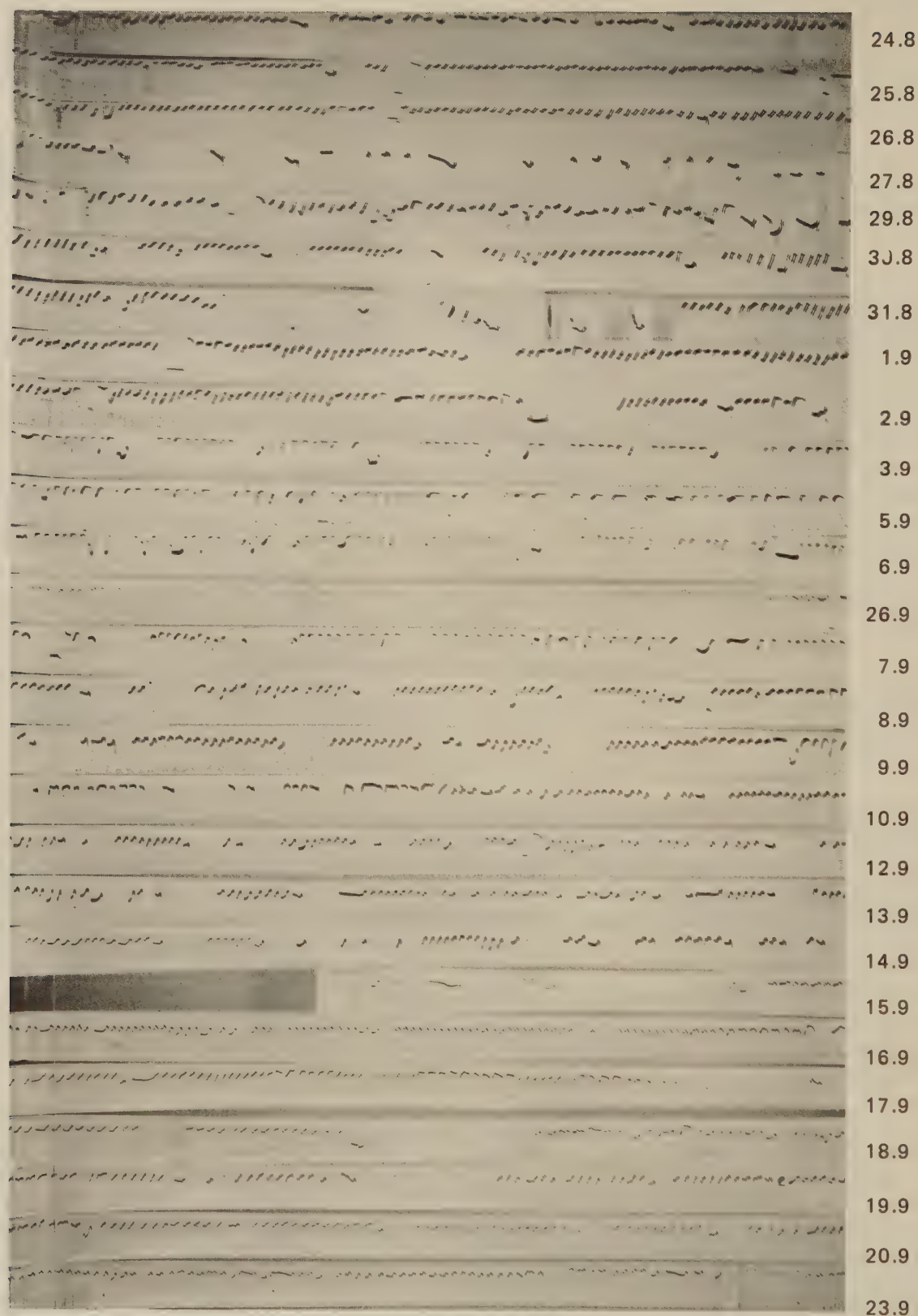


Fig. - 62 —Vue d'ensemble des enregistrements de l'énergie de malaxage.
Horizontalement, les enregistrements d'une même journée.

Le temps augmente de droite à gauche. A titre comparatif, on peut considérer que la fabrication est régulière les 16 et 20-9. Certains jours, l'aspect irrégulier des courbes n'est dû qu'à un réglage de l'appareil enregistreur (31-8 par exemple). Les gâchées correspondant à des zones de fissuration transversale complète sont repérées par des ronds gris (excepté le 26-8 dont toutes les gâchées du matin devraient être marquées).

TABEAU XIV

COMPARAISON QUALITATIVE ENTRE LES JOURNEES DE FABRICATION DU CHANTIER A

Exemple pour la lecture de ce tableau - Journée du 6 Septembre (11 fissures). De toutes les journées de production du chantier, elle vient en quatrième position (*) pour l'importance de l'écart entre les températures diurnes en nocturne (variation de température), en second pour la fréquence des irrégularité de fabrication en centrale, en troisième (**) pour la durée entre le début du sciage et la fin de la mise en place (retard).

	AOUT			SEPTEMBRE																								OCTOBRE								
	24	26	27	29	30	1	2	4	5	6	7	8	9	10	12	13	16	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	3	4	6	13	14	
CONDITIONS METEOROLOGIQUES JOURNALIERES évaporation variation de température précipitation	****	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	****	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	****	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
FABRICATION DU BETON irrégularité de la fabrication en centrale mélange de deux ciments de nature différente.				****						***																										

SCIAGE DES JOINTS retard						***				*	*	*	*	*	*	*	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
										*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
NOMBRE DE FISSURES TRANSVERSALES COMPLETES	1	22	0	9	0	0	1	0	0	11	0	0	0	0	0	2	3	0	2	0	0	0	3	0	10	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	

L'examen du tableau XIV montre que :

- les conditions météorologiques les plus défavorables a priori ne provoquent pas systématiquement de nombreuses fissures. Il n'y eut que 2 fissures le 13 Septembre, journée où l'évaporation fut la plus forte et 1 seule fissure le 24 Août, aucune le 21 Septembre, journées où les différences des températures diurne et nocturne furent les plus élevées (aucune fissure également pour les veilles de ces journées). Quelques unes des 22 fissures du 26 Août sont certainement dues en partie à une évaporation élevée ce jour là (la journée est classée deuxième pour cette caractéristique) mais, cette influence marquée est due à un défaut de fabrication évident : la mise en place du produit de cure destiné à réduire fortement l'évaporation de l'eau interne du béton a été interrompue pendant 1h30 ;
- certains jours, les fissures sont nombreuses sans que les conditions météorologiques du jour et du lendemain soient extrêmes. C'est le cas du 29 Août et du 6 Septembre ;

les trois journées de forte fissuration sont marquées par des anomalies dans la fabrication du béton : irrégularités de malaxage (29 Août et 6 Septembre), mélange de deux ciments d'origines différentes - présence de laitier dans un C.P.A.C. (26 Août).

Le mélange de deux ciments a été constaté également le 30 Août sans qu'il y ait de fissure ce jour là ; par contre, l'influence importante des irrégularités de malaxage sur la fissuration est confirmée par l'étude des causes accidentelles des fissures isolées.

4.3 - Comparaison entre gâchées

Les observations faites sur le même chantier que précédemment montrent que quatre types d'irrégularités semblent être à l'origine de la plupart des fissures :

- la répartition hétérogène ou le surdosage accidentel en ciment dans la gâchée :

L'hétérogénéité se manifeste par une variation anormale de la puissance de malaxage (Fig. 63). Pendant un mois de chantier, 34 courbes de ce type ont été observées, 30 % d'entre elles correspondent à des zones où des fissures sont apparues ;

- le surdosage accidentel en adjuvant :

L'irrégularité de la consistance des gâchées, jugée selon la courbe du wattmètre différentiel, peut être une cause de fissuration. Les fissures du 6 Septembre sont apparues sur un béton fabriqué ainsi (Fig. 64). Il est vraisemblable que l'apparence "mouillée" résulte du surdosage ou d'une arrivée tardive des adjuvants (plastifiant ou entraîneur d'air) ;

- la durée anormale de transport :

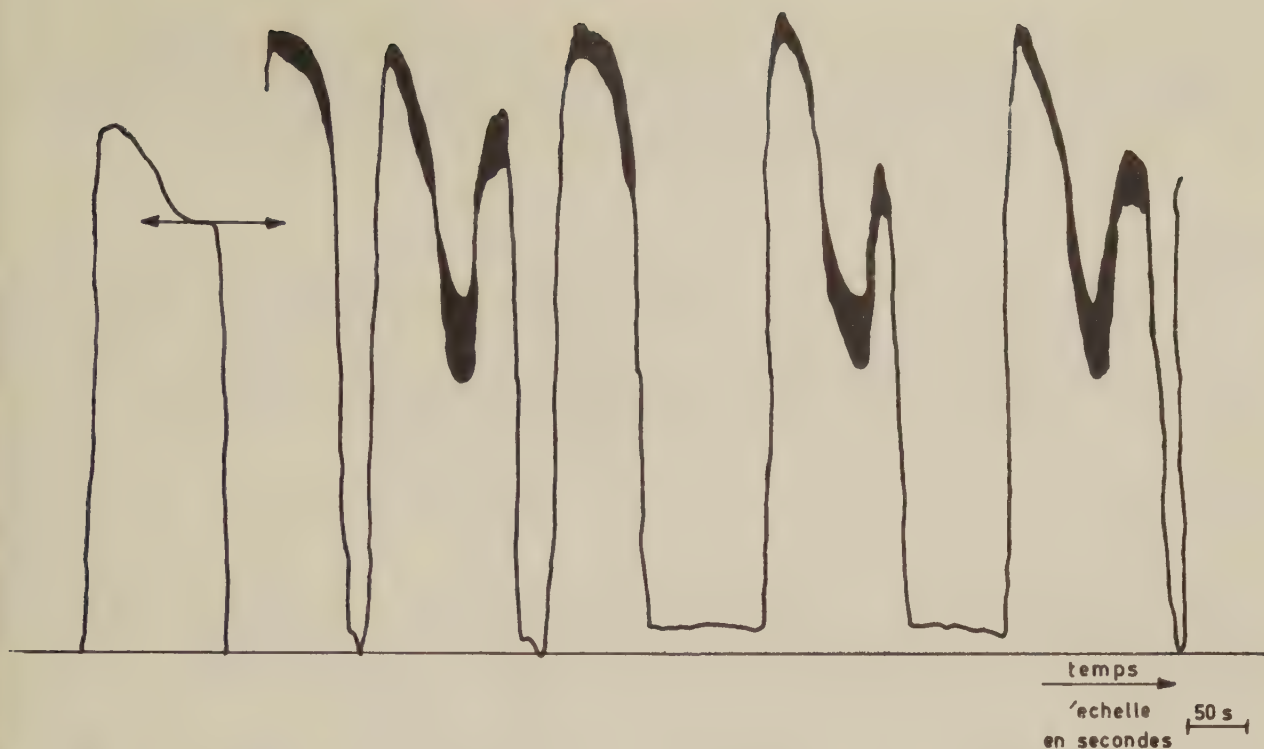


Fig. 63 - Variation anormale de la puissance du malaxage due à une arrivée tardive du ciment.

Le temps augmente de gauche à droite. A gauche, variation normale théorique, stabilisation en fin de gâchée de l'énergie de malaxage.
A droite, trois exemples de variation anormale : l'énergie augmente en fin de malaxage.

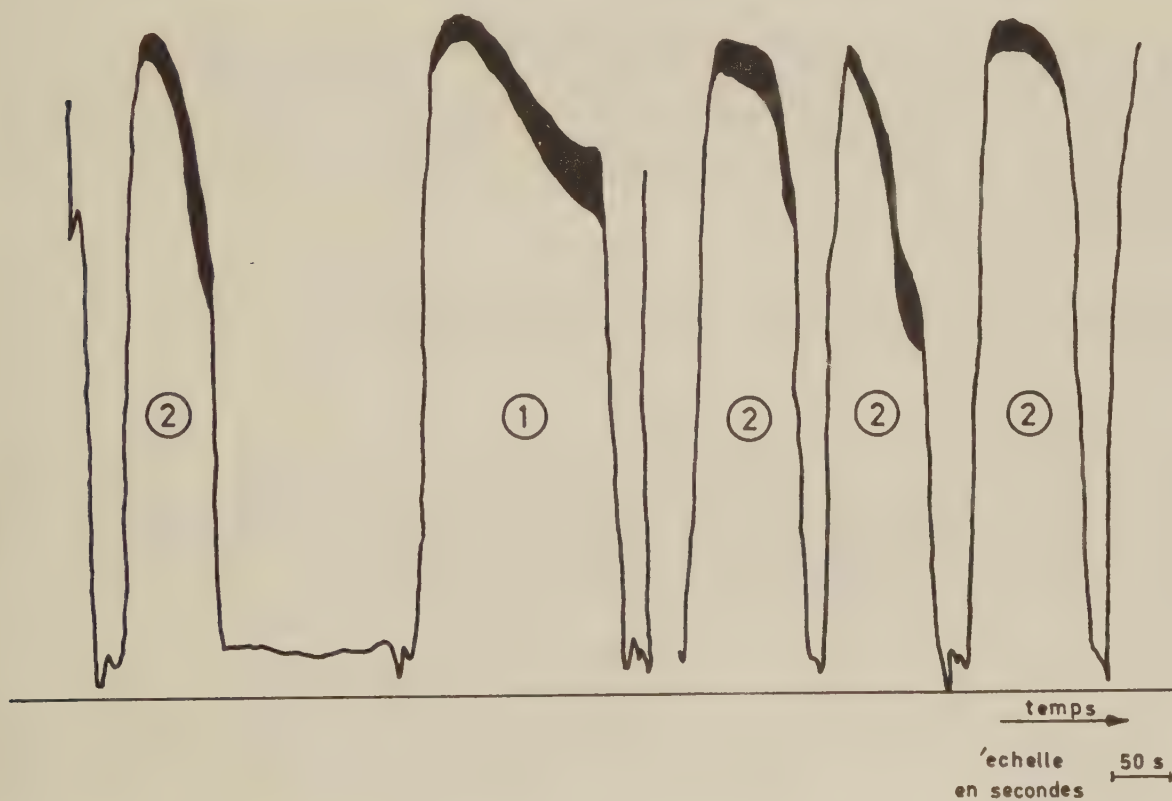


Fig. 64 - Irrégularité de la consistance des gâchées jugée d'après la variation de la puissance de malaxage :

- ① Variation normale de l'énergie de malaxage,
- ② Variation anormale caractérisée par une diminution brusque de l'énergie, en fin de malaxage.

Que ce soit par le retard dans le transport d'une gâchée ou par l'arrêt de la machine de mise en place, il peut arriver que deux bétons d'âges différents soient juxtaposés. Ainsi une des trois fissures du 16-9 correspond à une gâchée déversée et vibrée une heure après les autres du fait d'une panne de camion ;

- la variation accidentelle de l'énergie de vibration :

L'unique fissure du 2-9, trois fissures du 6-9 correspondent à des zones où la vibration du béton était irrégulière (avance, par à-coups de la machine de mise en place, variation de la puissance de vibration). Il faut cependant remarquer que ces anomalies n'entraînent pas en général de défaut de compacité.

Ces quatre types d'irrégularités présentent un caractère commun: la juxtaposition, dans le revêtement de deux volumes de béton dont le ciment ne fait pas prise en même temps.

Le cas du camion déversant sa gâchée avec un heure de retard en est, bien sûr, l'illustration typique mais le même effet résulte de :

- l'hétérogénéité en ciment :

Les réactions d'hydratation sont exothermiques. La chaleur dégagée par unité de temps et de volume de béton est proportionnelle au dosage en ciment. La conductivité thermique variant moins sensiblement, il en résulte que, à âge égal, en un point donné du revêtement, plus le dosage en ciment est fort, plus la température locale est élevée, plus les réactions d'hydratation sont rapides ;

- l'hétérogénéité en adjuvant :

Sur ce chantier, le plastifiant utilisé était ralentisseur de prise. Une dose doublée retardait le début de prise d'environ deux heures ;

- la variation accidentelle de l'énergie de vibration :

Le ciment utilisé sur ce chantier était le ciment A du Chapitre 2. Il a été montré que, pour ce ciment, l'énergie de vibration contribuait à faire pénétrer l'eau jusqu'au grain anhydre à travers la couche de produits hydratés formée au moment du malaxage. Il est donc vraisemblable qu'une variation de l'énergie de vibration modifie la vitesse des réactions d'hydratation.

5 - FISSURATION DES REVETEMENTS EN BETON HYDRAULIQUE PAR HYDRATATION LOCALEMENT DIFFEREE.

Une fissure apparaît, en général, comme le résultat d'un concours de circonstances essentielles et accidentelles.

Sous la diversité des circonstances, l'accident consiste souvent à retarder ou avancer l'hydratation du ciment. Il peut être limité à une gâchée mais parfois, une défaillance dans le matériel, une confusion dans les livraisons et la production d'une journée entière risque d'être endommagée.

L'effet de cette hétérogénéité - le mécanisme de ce type de fissuration - dépend de facteurs essentiels qui déterminent tout en chantier comme, par exemple, la nature des constituants choisis.

Toutes les fissures spontanées ne sont pas provoquées par une hydratation localement différée. Un produit de cure mal réparti, un sciage des joints trop tardif et des fissures se produisent, qui résultent d'un tout autre mécanisme. Telle qu'elle fut observée, la fissuration par hydratation localement différée, apparaît comme celle dont le risque subsiste, même lorsque les règles courantes de bonne exécution sont suivies.

A l'inverse d'autres types de fissuration, l'influence des circonstances exogènes comme les facteurs météorologiques paraît secondaire. Il semble que les risques de fissuration par hydratation localement différée puissent être réduits :

- par l'amélioration de la régularité de la fabrication,
- par un meilleur choix des constituants, en particulier, du ciment.

CHAPITRE 6

CHOIX DES CIMENTS POUR DIMINUER LE RISQUE DE FISSURATION PAR HYDRATATION LOCALEMENT DIFFÉRÉE

Au cours des premiers jours qui suivent sa mise en place, le revêtement en béton hydraulique se fissure parfois, l'éprouvette en pâte de ciment se déforme. Il est naturel de supposer qu'il s'agit de deux aspects d'un même phénomène ; de fait, de nombreuses études expérimentales sur le retrait visent la connaissance du mécanisme de la fissuration.

Cependant, la relation entre retrait et fissuration doit être établie, non pas a priori, mais en tenant compte des conditions observées de la fissuration.

1 - L'ANALYSE CLASSIQUE DU LIEN ENTRE RETRAIT ET FISSURATION ET SON INCAPACITE A RENDRE COMPTE DE LA FISSURATION H.L.D.*

Pour un revêtement continu, homogène, de grande longueur, non chargé, une section quelconque, suffisamment éloignée des extrémités, reste immobile, par raison de symétrie, quelles que soient les contraintes qui se développent. En laboratoire, il est possible de reproduire des conditions analogues en bloquant les extrémités d'une éprouvette prismatique posée sur un support horizontal.

Lorsque les extrémités de cette éprouvette sont libérées (et que le frottement sur le support est faible), on observe des variations dimensionnelles en relation avec les conditions de température et d'hygrométrie de l'atmosphère ambiante. Exposée à une atmosphère plus froide ou insuffisamment saturée, l'éprouvette se rétracte. Le même phénomène, lorsque les extrémités sont bloquées, développe, à l'intérieur de l'éprouvette, des contraintes de traction.

Les conditions de la rupture peuvent être exprimées en termes de contraintes ou de déformations. Pour s'en tenir à des grandeurs voisines de celles expérimentalement mesurables, on peut écrire [29] que la rupture (la fissuration) survient lorsque :

$$R_p = \Delta L_p \text{ (Fig. 65)}$$

* Abréviation pour «fissuration par hydratation localement différée».

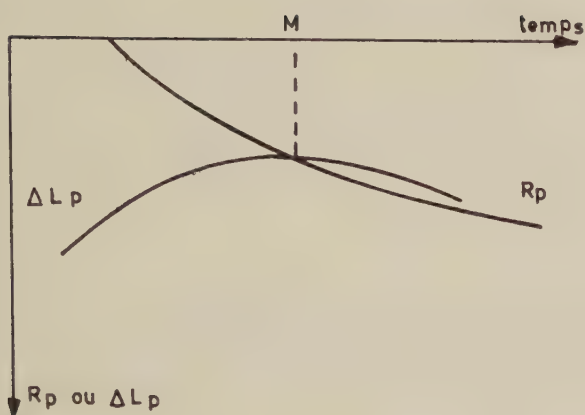


Fig. 65 - Illustration du lien classiquement établi entre retrait et fissuration.

Les deux courbes représentent l'évolution, en fonction du temps, du retrait potentiel (R_p) et de la déformation potentielle à la rupture ($\Delta\ell_p$). La fissuration survient en M, quand $R_p = \Delta\ell_p$.

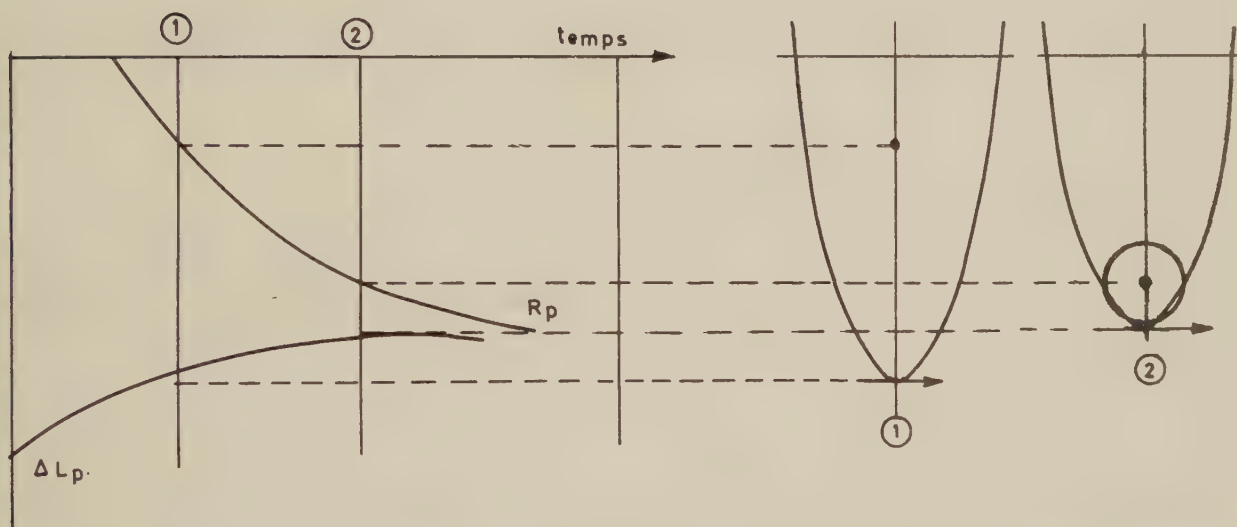


Fig. 66 - Incapacité de l'analyse classique du lien entre retrait et fissuration à rendre compte de certaines conditions possibles de fissuration (illustration schématique).

A gauche, la représentation classique. Ni en ①, ni en ② les conditions de la rupture ne semblent réalisées. A droite, représentation dans le plan de Mohr de la courbe intrinsèque et du tenseur des contraintes aux moments ① et ②. En ①, le tenseur des contraintes est sphérique, il n'y a aucun risque de rupture. En ②, l'hydratation, en se poursuivant, a «révélé» des hétérogénéités qui n'existaient pas en ①. Le tenseur des contraintes n'est plus sphérique, les conditions de la rupture sont, en fait, atteintes.

en désignant par :

R_p : le retrait potentiel sans déformation au temps t (retrait mesuré après la rupture lorsque toute contrainte a disparue).

$\Delta \ell_p$: la déformation potentielle à la rupture au temps t (voisine de la déformation potentielle à la rupture pour une vitesse faible de montée en charge).

Par analogie, ces conditions de rupture sont également celles du revêtement continu.

Tant que les joints ne sont pas réalisés, la fissuration présente, à terme, un caractère inéluctable* dont cette représentation des conditions de la fissuration peut rendre compte. Par contre, il semble qu'elle ne permette pas d'expliquer la fissuration par hydratation localement différée :

Retraits et déformations potentiels sont habituellement représentés chacun par un scalaire bien que ce soient, en fait, des tenseurs. On peut penser que, malgré cette simplification, il est possible de représenter correctement la "course" entre le développement des contraintes et l'acquisition des résistances. Cependant si l'effet de l'hydratation différée, déterminant pour la fissuration, est d'acquiesce localement, à un moment donné, le tenseur déviateur des contraintes plus rapidement que le tenseur sphérique, cette représentation simplifiée ne peut pas en rendre compte (Fig. 66).

2 - APPROFONDISSEMENT DU MECANISME DE FISSURATION H.L.D.

Le tableau XV permet de comparer les chantiers de revêtements en béton sur lesquels une même nature de granulats fut utilisée. Le sable, pour tous ces chantiers, contient moins de 30 % de calcaire, les cailloux et gravillons sont silico-calcaires ou entièrement calcaires. Le ciment utilisé sur chacun de ces chantiers est caractérisé par la vitesse de second retrait maximale de sa pâte normale. On constate que :

- à vitesse de second retrait du même ordre il y a moins de fissures** pour des bétons composés avec des cailloux et gravillons calcaires ;
- pour des bétons composés avec des granulats de nature semblable, les fissures sont d'autant plus nombreuses que la vitesse maximale de second retrait est grande

* Dans les conditions actuelles de la technique.

** Seules sont comptées les fissures transversales traversant entièrement la dalle, à l'exclusion de celles dues à un retard du sciage des joints.

TABLEAU XV

FISSURATION ET VITESSE MAXIMALE DE SECOND RETRAIT

Nature des cailloux et gravillons	Silico-calcaire		Calcaire			
Lettre symbolisant le chantier	a	d	e	f	g	h
Vitesse maximale de second retrait de la pâte normale du ciment utilisé en $\frac{\Delta l}{l} 10^5 h^{-1}$	7	0,6	4	4	0,3	< 1
Nombre de fissures pour 10 km de revêtements	24	4	10	5	< 1	< 1

Les résultats sur lesquels ces constatations sont fondées sont évidemment peu nombreux car chacun représente 20 km d'autoroute environ. Depuis 1967 on choisit de préférence les ciments correspondant à une faible vitesse de second retrait et on n'observe sur les chantiers que très peu de fissures*.

La fissuration H.L.D. du béton semble donc liée à la vitesse de second retrait de la pâte de ciment. Le second retrait, résultant de l'hydratation, doit nécessairement se produire dans la pâte de ciment, même au sein du béton**. Cependant, si on mesure les variations de longueur d'une éprouvette de mortier (et à fortiori de béton) on n'observe en général aucun gonflement et un retrait après prise presque nul.

On est conduit à supposer que le gonflement et le second retrait de la pâte, contrariés au sein du béton par la présence des granulats, provoquent des microfissures. On observe effectivement celles-ci dans le béton durci et semble-t-il d'autant plus que la vitesse de second retrait est élevée (Fig. 67).

Les micro-fissures peuvent assurer localement, dans une certaine mesure, la libre déformation de la pâte dans le béton. Lorsque deux volumes de béton sont juxtaposés sans que les réactions d'hydratation de leur ciment soient simultanées, il se produit localement des contraintes de cisaillement, d'autant plus grandes que la vitesse de second retrait est élevée. Ces cisaillements provoquent à leur tour de nouvelles micro-fissures. A la différence des premières, celle-ci sont orientées et peuvent, en se rejoignant, provoquer la fissuration du béton.

Dans cette perspective, la différence entre les bétons de granulats calcaires et ceux de granulats de silex, quant au risque de fissuration, pourrait être attribuée à la plus ou moins grande facilité avec laquelle une micro-fissure contourne un granulat. L'adhérence pâte-silex est pratiquement nulle, celle pâte-calcaire peut être, au contraire très forte [30] .

* Dues, le plus souvent, à des fautes flagrantes telles que : insuffisante protection contre l'évaporation ou retard de sciage.

** On pourrait objecter que la pâte de ciment étudiée aux chapitres 2, 3 et 4 est la pâte normale dont le rapport eau/ciment (0,3 en poids) est inférieur à celui de la pâte au sein du béton (entre 0,4 et 0,5). D'après les résultats de del Campo [15] (Chap. 4, par.2) la vitesse du retrait après prise, augmente avec le dosage en eau de la pâte.



Fig. 67 - Coupes de deux bétons (grossies 180 fois) :

- 1 - grain de sable,
- 2 - air occlus,
- 3 - microfissures

La vitesse maximale de second retrait exprimée en $\frac{\Delta \rho}{\rho} 10^5 \text{ h}^{-1}$ est égale

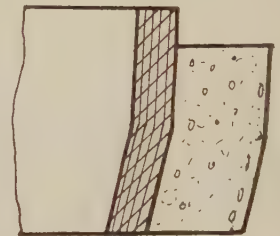
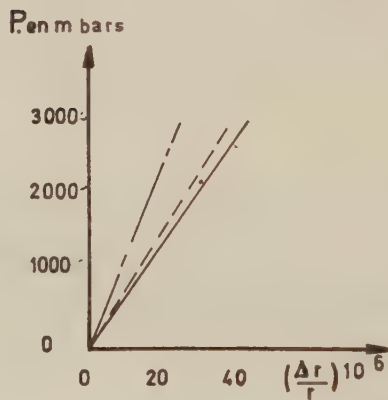
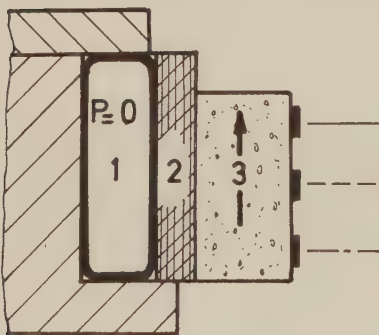
à 4 pour le ciment du béton de gauche microfissuré et à 0,3 pour le ciment du béton peu microfissuré

Ensemble vessie (1)
bague (2) éprouvette (3)
avant la mise en pression ($P = 0$)

Variation
en fonction de la pression
des déformations données par les jauges

Déformation (grossie)
de l'éprouvette
sous l'effet de la pression (3 000 mbars)

Premier type d'essai



Deuxième type d'essai

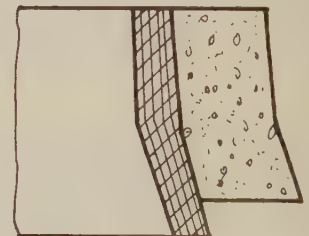
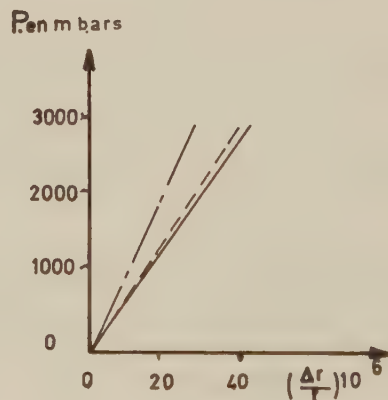
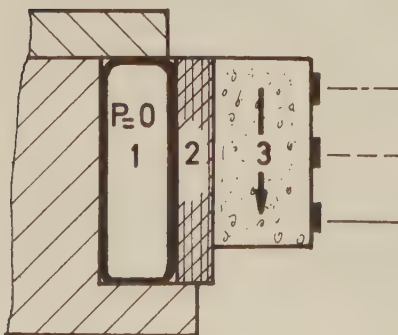


Fig. 68 - Hétérogénéité d'une éprouvette annulaire de mortier.

Deux essais ont été réalisés avec la même éprouvette. D'un essai à l'autre, l'éprouvette et la bague d'altuglass ont été retournées ensemble. On constate que ce sont toujours les mêmes jauges qui donnent les plus fortes déformations ou, en d'autres termes, que l'éprouvette se déforme toujours de la même façon, qu'elle soit ou non retournée.

Au chapitre 4 on a montré que le second retrait était vraisemblablement le résultat de l'action simultanée du retrait du gel et du foisonnement ; on peut donc se demander quelle est la part de ces deux phénomènes dans le mécanisme de la fissuration H.L.D.

Si le foisonnement résulte, comme il a été supposé, d'un équilibre entre les forces de tension superficielle et celles de Van der Waals, il ne fait pas intervenir la rigidité de la phase solide. Pour cette raison il semble qu'il ne doit pas intervenir dans le mécanisme de la fissuration H.L.D.* Ce mécanisme ne dépendrait que du retrait du gel et donc, de la chaleur d'hydratation.

L'étude de l'essai classique de fissurabilité permet d'établir expérimentalement cette dépendance.

3 - L'ESSAI CLASSIQUE DE FISSURABILITE A L'ANNEAU**

Cet essai consiste à mouler un anneau de pâte normale de ciment autour d'un noyau rigide. L'éprouvette est conservée 24 heures dans une atmosphère saturée puis démoulée et exposée à une atmosphère de température 20°C et d'hygrométrie 50 %. On note la durée d'exposition nécessaire pour que l'éprouvette se fissure ; plus cette durée est courte, plus le ciment est jugé fissurable.

Cet essai pourrait être considéré comme l'illustration expérimentale du lien classique entre retrait et fissuration. L'éprouvette, en se desséchant, subirait, si elle était libre, un retrait capillaire ; ce retrait, gêné par le noyau rigide, crée des contraintes qui s'accroissent plus vite que les résistances mécaniques et donc, au bout d'un certain temps, provoquent la rupture de la pâte de ciment. Lorsque l'hygrométrie ambiante diminue, le dessèchement est plus rapide, la pâte se rompt plus vite.

Cette explication ne concorde pas avec la conclusion du chapitre 4 selon laquelle l'incidence du retrait capillaire sur les déformations après prise de la pâte de ciment serait négligeable ; elle ne rend pas compte non plus d'une observation faite par M. Venuat [31] : l'âge de la pâte de ciment, au moment de la rupture, reste le même lorsque la durée de conservation en atmosphère saturée varie entre 8 et 24 Heures.

L'évaporation de l'eau interne ne produit pas seulement des tensions capillaires ; elle contribue semble-t-il à retarder l'hydratation au voisinage de la face exposée. Sur une éprouvette de mortier âgée d'une semaine, le module d'élasticité est plus faible (de 20 %) près de la face exposée que près des faces moulées (Fig. 68).

* Cette déduction ne signifie pas que le foisonnement ne peut pas être dangereux, mais que le mécanisme des ruptures dues au foisonnement est tout autre que le processus H.L.D.

** Cet essai fait l'objet d'une fiche de documentation technique AFNOR P 15 434.

L'évaporation peut donc retarder l'hydratation et, d'autant plus, qu'elle est plus rapide. On peut, dans ces conditions, faire l'hypothèse que la rupture de l'anneau est une fissure H.L.D.

S'il en est ainsi, la pâte se fissurerait d'autant plus vite que la vitesse maximale de second retrait est forte et donc, conformément aux déductions du paragraphe précédent, que la vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation est élevée.

On a vérifié qu'il existait une corrélation entre le temps de fissuration à l'anneau (t_f) et la vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation, mesurée dans des conditions semi-adiabatiques $\left(\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max}\right)^*$:

$$\frac{1}{t_f} = \frac{1}{30} \left[\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max} - 2 \right] \text{ (équation approchée)}$$

t_f est exprimé en heures (l'origine des temps se situe 24 heures après la fin du malaxage).

$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max}$ est exprimé en cal/h par gramme de ciment anhydre.

Cette corrélation a été établie avec 7 ciments du commerce (C.P.A. 325, C.P.A.L.C. 400, H.T.S.) et des clinkers broyés et additionnés de gypse en laboratoire utilisés au chapitre 4. Le coefficient de corrélation est relativement élevé : 0,87**.

Ce résultat ne peut pas être expliqué si l'on suppose que le rôle déterminant de l'évaporation est d'augmenter les tensions capillaires. Par contre il est conforme à l'hypothèse d'une fissuration H.L.D. de l'anneau.

En principe cet essai devrait donc permettre de juger correctement les ciments vis-à-vis du risque de fissuration H.L.D. Pourtant, depuis plusieurs années, il est très largement critiqué. On lui reproche :

- de n'être relié à aucune autre caractéristique des ciments ; les résultats donnés ci-dessus éliminent cette première objection ;
- de donner des résultats dispersés ; M. Raverdy [32] a montré que cette dispersion pouvait être considérablement réduite si la pâte était mise en place d'une façon appropriée ;
- de ne pas être reproductible d'un laboratoire à un autre.

* Cette vérification a été faite au L.R. des Ponts et Chaussées de Marseille.

** Les ciments C4, C6, C8 ont des temps de fissuration très courts (2 heures ou moins), inférieurs à ce que donnerait la corrélation, compte-tenu de la vitesse maximale de dégagement de chaleur (7,8 cal/g.h). Ces ciments font partie (avec A9 et A10) de la catégorie pour laquelle une diminution du foisonnement s'ajoute au retrait du gel.

L'évaporation dépend en effet de l'hygrométrie de la salle d'essai, (connue en général à $\pm 5\%$ et des courants d'air, rarement connus, difficilement normalisables!)

4 - INDICE DE NERVOSITE DU CIMENT

On cherche à caractériser l'influence du ciment sur le risque de fissuration H.L.D. du béton. Les résultats expérimentaux de cette étude et leur interprétation, conduisent à proposer, pour cela, une seule caractéristique : la vitesse de dégagement de chaleur d'hydratation.

En tant que critère de rupture il faudrait, en principe, deux caractéristiques, l'une pour l'accroissement des contraintes, l'autre pour le développement des résistances. Cependant, si, comme on a cherché à le montrer, la fissuration H.L.D. du béton résulte du retrait du gel, provoquant la micro-fissuration de celui-ci, une seule caractéristique suffit. Les propriétés mécaniques du gel - "matériau hétérogène (produit par l'hydratation) sous sa forme la plus dense" - sont, en effet, comme l'a montré T.-C. Powers [7], constantes dans le temps et pratiquement identiques d'un ciment à l'autre.

Nous proposons donc d'appeler "Indice de nervosité du ciment" la vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation (mesurée dans des conditions définies), susceptible de caractériser, à elle seule l'influence du ciment sur le risque de fissuration H.L.D. du béton*.

Il devrait être possible d'aboutir à une règle simple, pour le choix des ciments en fixant une limite supérieure à l'indice de nervosité. Il est indispensable que les conditions de sa mesure soit bien définie :

- isothermes, adiabatiques ou, peut être mieux (car moins chères et plus proches de la réalité), semi-adiabatiques ; dans ce dernier cas, il faut fixer des tolérances pour la valeur des coefficients de déperdition thermiques ;
- composition de l'éprouvette, pâte, ou mieux, mortier ou béton ; proportions et natures des constituants.

Le processus opératoire de la "méthode de la bouteille isolante" (bouteille thermos) mis au point au C.E.R.I.L.H. et l'expérience acquise par ce laboratoire, forment une base solide pour définir ces conditions.

A titre indicatif, en utilisant cette méthode, l'éprouvette avant la composition d'un mortier normal, l'équation de déperdition étant $\alpha = 0,055\theta + 18,1$, la valeur maximale fixée, pour l'indice de nervosité, pourrait être des 4 cal/g de ciment/heure. D'après les résultats de la figure 69, cette valeur correspond à un temps

* L'expression « Indice de nervosité » a été choisie par analogie avec les termes couramment utilisés sur chantier : un ciment est dit « nerveux » s'il « tire » vite (si sa prise est rapide).

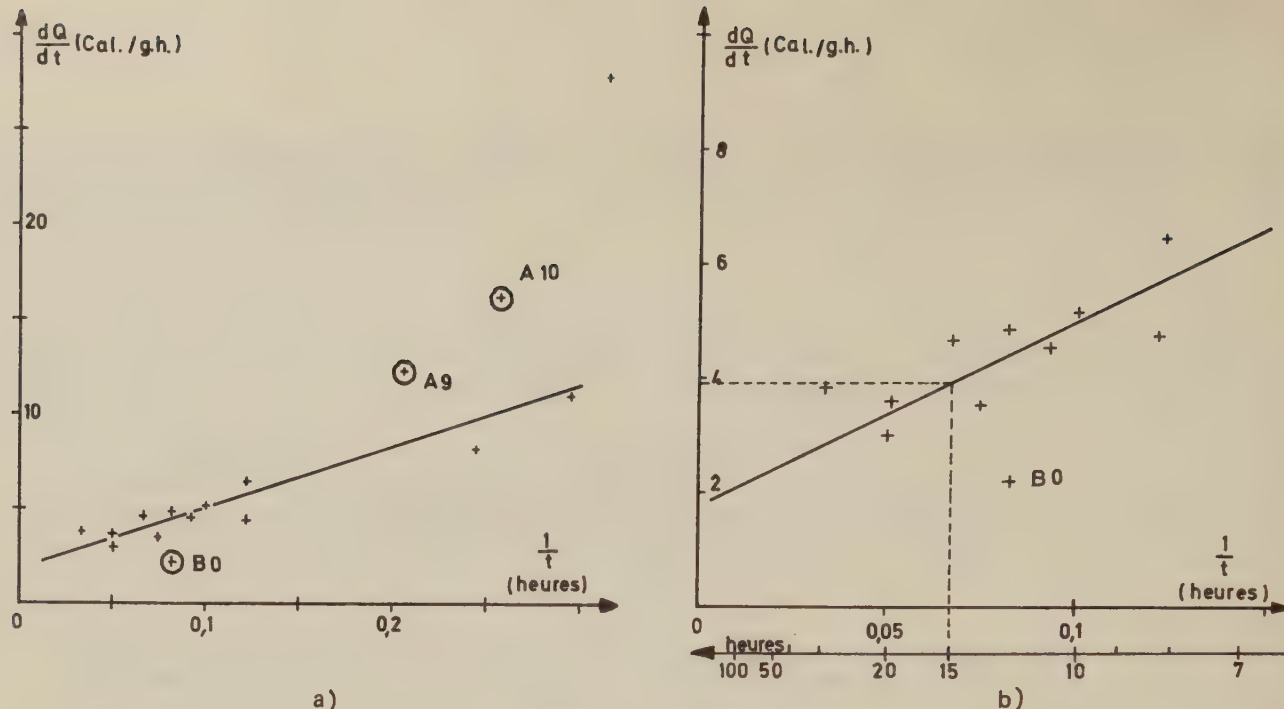


Fig. 69 - Corrélation entre le temps de fissurabilité à l'anneau et la vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation mesurée avec la méthode «Thermos» sur mortier normal (coefficient de corrélation 0,87).

- a) les points entourés correspondent : aux ciments A₉ et A₁₀ étudiés au chapitre 4 (pour lesquels la diminution du foisonnement s'ajoute au retrait du gel) et au clinker B₀.
- b) même corrélation à une plus grande échelle pour les temps de fissuration supérieurs à 7 heures.

de fissuration de 15 heures, temps limite fixé actuellement par le fascicule 28 du Cahier des Prescriptions communes : "construction des chaussées en béton" et par la Directive provisoire pour l'exécution des ponts en béton précontraint.

Les résultats expérimentaux qui ont permis d'aboutir à l'indice de nervosité ne concernent que les ciments C.P.A. avec ou sans constituants secondaires (laitier ou cendres). En un premier temps, l'usage de cet indice devrait donc être limité à ces ciments. L'effet des agents de mouture, des adjuvants, de la température ou de toute innovation, sur le risque de fissuration H.L.D. ne doit pas être jugé d'après les changements de valeur de l'indice mais faire l'objet d'une recherche particulière.

L'étude montre également que l'indice de nervosité ne permet pas de juger les ciments pour lesquels une diminution du foisonnement s'ajoute au retrait du gel. Cependant, il est probable que ces ciments sont rares en pratique et que leur emploi devrait toujours être évité. L'interprétation de ce phénomène, donnée au chapitre 4, suppose une microfissuration du gel par un foisonnement excessif. Cette microfissuration s'ajoute à celle due à l'hydratation localement différée et facilite la fissuration du béton.

Si l'on envisage une mise en pratique des résultats de cette étude, il semble donc qu'il faudrait prévoir une action en deux temps :

1°) - reconnaissance du ciment :

en mesurant en isotherme la déformation et le dégagement de chaleur de la pâte ce qui permettra :

- de connaître si le foisonnement est excessif (s'il passe par une valeur maximale) ;

- de déterminer la valeur précise du coefficient qui relie le retrait du gel au dégagement de chaleur ;
- de dépister les exceptions toujours possibles.

2°) - contrôle :

- par l'indice de nervosité.

CONCLUSIONS

Après la période "dormante" une éprouvette de pâte de ciment manifeste un premier retrait, puis un gonflement, enfin un second retrait.

Le premier retrait se produit avant la prise et résulte, au moins en partie, des tensions capillaires qui se développent soit par "l'auto-dessiccation" provoquée par l'hydratation du ciment, soit par l'évaporation de l'eau interne. La valeur du premier retrait dépend de la nature du ciment mais cette influence reste faible par rapport à celle du climat. Plus l'hygrométrie ambiante est faible et plus la vitesse du vent est forte, plus le premier retrait est important ; inversement un bon produit de cure, correctement mis en oeuvre, peut le réduire efficacement.

Le gonflement et le second retrait, par contre, ne sont pratiquement pas affectés par l'évaporation de l'eau interne et ils se manifestent même dans des conditions isothermes. La valeur de la vitesse maximale de second retrait peut varier du simple au décuple suivant la nature du ciment.

L'observation des conditions de la fissuration spontanée des revêtements montre, parallèlement, que, lorsque la protection du béton contre le départ de son eau interne est bien faite, le climat est finalement moins important que la régularité de la fabrication et le choix des constituants du béton, en particulier du ciment.

°

° °

L'étude a cherché à préciser comment l'hydratation du ciment qui crée la résistance mécanique du béton peut également provoquer sa rupture.

Le mécanisme de la fissuration présente à la fois un aspect systématique (développement des contraintes liées à l'hydratation) et accidentel (nature et influence des anomalies de fabrication). On s'est efforcé d'analyser et de caractériser l'un et l'autre. En laboratoire, l'expérimentation n'a pas été poursuivie jusqu'à la séparation des phénomènes élémentaires et il a fallu interpréter les résultats ; sur le chantier, l'observation, malgré des moyens exceptionnels, a surtout apporté des indices et il a fallu les apprécier pour les ordonner. Lorsque la preuve semblait inaccessible, c'est toujours l'hypothèse d'une uniformité des causes qui a été faite.

1 - ASPECT SYSTEMATIQUE DU MECANISME DE FISSURATION : LE RETRAIT DU GEL

La décomposition de la déformation de la pâte de ciment en "foisonnement" et "retrait du gel" - possible à priori d'une infinité de manière - a été faite en supposant qu'une partie au moins de la déformation était liée à la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation, d'une façon approximativement semblable pour tous les ciments. Cette hypothèse (inspirée par l'ensemble des travaux de T.-C. Powers) permet une décomposition unique et on vérifie que :

- le foisonnement est du même ordre que l'éprouvette soit immergée ou non, ce qui est conforme à la théorie de H. Lafuma ;
- la valeur du retrait du gel est susceptible d'une interprétation physique.

L'apport de cette étude consiste à montrer expérimentalement que :

- le foisonnement n'est pas lié à la présence d'un excès d'eau au-dessus de l'éprouvette ; il peut se produire même lorsque l'éprouvette est exposée à une atmosphère non saturée ;
- la comparaison, souvent faite, entre la contraction de l'ensemble ciment-eau et une auto-dessiccation n'est pas entièrement valable d'un point de vue thermodynamique ; pour le retrait du gel tout se passe comme si c'était seulement l'eau la plus liée physiquement qui partait.

Le "retrait du gel" est dénommé ainsi parce qu'il semble affecter uniquement le gel - au sens que Powers donne à ce terme : l'agglomérat le plus dense des produits de l'hydratation - Les propriétés mécaniques du gel sont pratiquement constantes du début à la fin de l'hydratation. Dans un milieu homogène, le gel est soumis à un tenseur sphérique de contraintes de compression proportionnelles à la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation. Le coefficient de proportionnalité est approximativement le même quel que soit le ciment ; il dépend de la température à laquelle se produisent les réactions.

2 - ASPECT ACCIDENTEL DU MECANISME DE FISSURATION : HYDRATATION LOCALEMENT DIFFEREE

C'est un caractère commun aux conditions particulières qui, au niveau des gâchées, concourent le plus souvent, à la fissuration des revêtements : les réactions, d'hydratation du ciment de deux volumes de béton juxtaposés ne sont pas simultanées.

On a supposé que c'était le facteur déterminant de la fissuration, car il était ainsi possible de concevoir :

- l'importance de la régularité de fabrication, observée dans la comparaison entre les journées de bétonnage ;
- l'influence du choix du ciment, observée dans la comparaison entre les chantiers.

L'apport des constatations faites est de montrer l'influence possible, sur la fissuration des bétons, d'anomalies, telles que : surdosage en ciment ou en adjuvants retardateurs, malaxage insuffisant, arrêts de centrale, retards de transport jusqu'à la mise en oeuvre, reprise, faiblesse de l'énergie de vibration (même s'il n'en résulte pas un défaut de compacité du béton). Ces "accidents" modifient peu, en général, les résistances du béton à long terme et même, parfois, les améliorent.

3 - RETRAIT ET FISSURATION

Le lien entre retrait et fissuration établi par cette étude n'est pas dénué d'incertitude. Il résulte en effet de deux déductions qui n'ont pas pu être directement vérifiées.

- l'apparition de micro-fissures au sein du béton au début de la période de gonflement ce qui permet le libre retrait du gel ;
- l'indépendance du mécanisme du foisonnement face à l'hydratation localement différée et donc le rôle exclusif du retrait du gel.

On aboutit ainsi au schéma suivant du mécanisme de la fissuration des bétons par hydratation localement différée :

Au fur et à mesure du durcissement, le béton est charpenté par le gel, produit achevé de l'hydratation, contraint d'autant plus que celle-ci est plus avancée. Une hydratation non simultanée de deux volumes de béton juxtaposés crée des contraintes de cisaillement d'autant plus fortes que l'hydratation est plus rapide. Excessives, celles-ci provoquent la micro-fissuration du gel et la fissuration du béton non armé.

Puisque les résistances mécaniques du gel sont constantes, l'influence du ciment sur le risque de fissuration H.L.D. des bétons peut être caractérisée par un seul indice, par exemple, la vitesse maximale de retrait du gel, ou encore la vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation.

Ce schéma est le résultat des hypothèses simplificatrices faites au cours de l'étude. Il est très différent de celui qui résulte du lien classique entre retrait et fissuration ; ce lien n'est d'ailleurs pas, non plus, exempt d'hypothèses simplificatrices puisqu'il exclut, a priori, l'influence possible de l'hydratation localement différée.

Dans l'essai classique de fissurabilité à l'anneau, le temps de fissuration est inversement proportionnel à la vitesse maximale de dégagement de chaleur mesurée dans des conditions semi-adiabatiques. Ce résultat expérimental contribue à étayer ce schéma de la fissuration H.L.D. ; il montre aussi que celle-ci peut être en cause dans certains cas de rupture pour lesquels une explication plus classique a parfois été retenue.

Le béton hydraulique peut se fissurer pour de multiples causes : déformations imposées, charges, retraits hydrauliques ou thermiques, gonflements etc... ; l'hydratation localement différée du ciment peut, à elle seule, être également cause de fissuration.

La plupart des fissures spontanées qui endommagent les revêtements en béton hydraulique non armé semblent résulter de ce mécanisme ; de même, la rupture de l'anneau de pâte de ciment dans l'essai classique de fissurabilité. La température, l'évaporation de l'eau interne, influencent la cinétique de l'hydratation ; il est donc possible que de nombreuses autres fissures attribuées jusqu'ici aux retraits hygrothermiques soient, en fait, du type H.L.D. Dans les ouvrages armés ou précontraints, l'hydratation localement différée peut être la cause, sinon d'une fissuration complète du moins d'une micro-fissuration importante, chemin de pénétration des agents de corrosion.

Les risques de fissuration H.L.D. peuvent être réduits :

- en veillant sur le chantier à la régularité de fabrication ; il faut obtenir non seulement des résistances mécaniques à long terme peu dispersées mais, ce qui est plus difficile, une cinétique régulière de l'hydratation du béton en place ;
- en augmentant l'adhérence entre granulats et pâte de ciment ;
- en choisissant un ciment dont l'hydratation est la plus progressive possible.

Pour un ciment C.P.A. avec ou sans additions secondaires, utilisé sans adjuvant et aux températures ordinaires ce choix peut être fondé sur la valeur de "l'indice de nervosité" (vitesse maximale de dégagement de chaleur d'hydratation mesuré dans des conditions définies).

L'influence des adjuvants ou de l'étuvage sur le risque de fissuration des bétons n'a pas été étudié. Il est vraisemblable (mais à vérifier) que l'indice de nervosité reste valable pour juger celle des plastifiants et entraîneurs d'air ; par contre, l'étuvage des bétons modifie certainement les propriétés physiques du gel et ses effets doivent être étudiés.

Enfin l'emploi des ciments dont le foisonnement excessif passe par un maximum et diminue ensuite en s'ajoutant au retrait du gel (probablement parce que le gel est micro-fissuré) doit être soigneusement examiné, même lorsque l'indice de nervosité est faible.

°
° °

En laboratoire, de nombreuses dispersions proviennent vraisemblablement d'une hydratation localement différée involontaire. Les processus opératoires cherchent surtout en général à obtenir la régularité des compacités ; l'étude montre qu'il

faudrait rechercher également, plus encore que sur le chantier, la régularité de l'hydratation. De nouveaux facteurs doivent alors être pris en compte dans les processus comme, l'âge du ciment anhydre et sa conservation, le temps entre malaxage et vibration, l'énergie de vibration (définie plus précisément que ne l'exige la seule obtention d'une compacité correcte)... etc.

L'étude de l'apparition des micro-fissures de la pâte de ciment est susceptible d'éclairer les lois de l'évolution des résistances mécaniques au premier âge.

Les mesures simultanées des déformations des pâtes de ciment et de la chaleur d'hydratation du ciment dans des conditions semblables peuvent être un moyen fructueux d'étude de la physico-chimie de l'hydratation. Le dégagement de chaleur fournit une image synthétique de la cinétique des processus ; la connaissance de la déformation des pâtes devrait contribuer à les séparer et les analyser.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L'HERMITE R., *Volume change of concrete*, Chemistry of cement, 4e symposium international - Washington 1960, National Bureau of standard Monograph 43 vol. 2 660-661.
VIRONNAUD L., *Le premier âge du béton*, Annales de l'I.T.B.T.P. N° 154 (oct. 1960), 1003-1016.
- [2] DUTRON R. et MOMMENS A., *Retrait plastique des mortiers et bétons frais*, Bulletin technique N° 65 - Laboratoire d'essais et de contrôle du Groupement des producteurs de ciment de Belgique (G.P.C.).
- [3] PELTIER R., *Caractéristiques et dispersion des ciments fabriqués en France*, Annales de l'I.T.B.T.P. (juillet - août 1969).
- [4] LEVY P., *La précision des mesures du retrait hydraulique après prise*, Colloque international Rilem/Cembureau sur le retrait des bétons hydrauliques, 20-22 mars 1968 à Madrid.
- [5] VENUAT M., *Propriétés des ciments chauds refroidis ou évités*, Revue des Matériaux de Construction et des T.P. N° 597.
- [6] DELOYE F.-X., *Trois années de mesure de surfaces spécifiques B.E.T. au Laboratoire Central*, Bull. de Liaison des Labo. routiers des P. et C., 30 (mars-avril 1968), 129
- [7] POWERS T.-C., *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*, Portland cement association, Bull. 22 (mars 1948).
- [8] HERNIBROOK, KALOUSEK et JUMPER, (Bureau of standards) Research paper 887, 1937, vol. 16 p. 487 et suivantes ; cité par la Revue des Matériaux de Construction et des T.P. N° 349 (octobre 1938).
- [9] BATES P.-A., *Concrete* (Chicago) vol. 45 N° 7, (juillet 1937) 209 ; cité par la Revue des Matériaux de Construction et des T.P. N° 349 (octobre 1938).
- [10] VOÏNOVITCH I.-A. et collaborateurs, *Analyse rapide des ciments*, Chimie Analytique, vol. 50 N° 6 (juin 1968).
- [11] DELOYE F.-X., *La formule de Bogue a quarante ans*, Bull. de Liaison des Labo. routiers des P. et C., numéro spécial O «Journées des ciments 1969».
- [12] LERCH W., *Plastic shrinkage*, Journal of the American Concrete Institute, vol. 28 N° 8 (février 1957).
- [13] RAVINA D. et SHALON R., *Shrinkage of fresh mortars cast under and exposed to hot dry climate conditions*, Publication III E au Colloque international Rilem/Cembureau du 20-22 mars 1968 à Madrid.
- [14] SHACLOCK B.-W., *The early shrinkage characteristics of hand placed concrete*, Magazine of Concrete Research, vol. 10 N° 28-3-12 (mars 1958).
- [15] DEL CAMPO M., *Contribución al estudio de la retracción intrínseca de la pasta de cemento*, Publicación N° 127, Laboratorio Central de Essayo de Materiales de Construcción (Madrid 1963).
- [16] BARON J., BRACHET-ROLLAND M. et PIDOUX J.-C., *Choix des ciments pour diminuer le risque de fissuration des revêtements en béton*, Publication I₂ au Premier symposium européen sur les revêtements bétonnés, organisé par Cembureau, 2-4 juillet 1969 à Paris.
- [17] LERCH W., *The influence of gypsum on the hydration and properties of Portland cement pastes*, Rapport présenté au 49e Congrès annuel de l'A.S.T.M. (24-28 juin 1946).
- [18] CLERET DE LANGAVANT, *La mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par la méthode thermos*, C.E.R.I.L.H., Publication technique N° 7 (1948).
- [19] ZAPOROJETZ I. - D., UKOROKOV S. - D. et PARIJSKY A. - A., *Chaleur d'hydratation des bétons*, Izdatelstvo literatury po stroitelstvu (Léningrad 1966).
- [20] LE CHATELIER H., *Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments*, Bull. Soc. de l'encouragement pour l'industrie nationale, 5e série, (1900), 54-57.
- [21] CZERNIN W., *Sur la contraction du ciment pendant la prise* (über die Schrumpfung des erhärtenden Zementes) Zement, Kalk, Gips, 11 (1956), 525-530.
- [22] ALEXANDER K.-M. et WARDLOW J., *Discontinuous shrinkage of hardened Portland cement pastes and mortars, Subjected to continuous drying*, Australian Jour. Appl. Sci. 10 N° 2 (1959).
- [23] POWERS T.-C., *Some physical aspects of the hydration of Portland cement*, J. Res. Development Lab. U.S.A. 3 (janvier 1961), 47-56.
- [24] FORRESTER J.-A. *Travaux de recherche actuels sur la cinétique des phases initiales de l'hydratation du ciment*, Colloque Cembureau sur les manifestations thermiques de l'hydratation (Paris, avril 1969).
- [25] FULTON F.-S., *The early dilatation of Portland cement pastes*, Portland cement Institute, Laboratory report SF-7 Johannesburg (octobre 1963).
- [26] LAFUMA H., *Théorie de l'expansion des liants hydrauliques*, Revue des Matériaux de Construction et des T.P. décembre 1929 (441-444) et janvier 1930 (4-8).
- [27] PAREY Ch., *Construction des chaussées en béton, constatations 1966*, Bull. de Liaison des Labo. routiers des P. et C. 39 (juil. - août 1969), 99-140.
- [28] DELUDE P. et AMBROSINO R., *Le contrôle du béton, méthode du laboratoire régional de Bordeaux*, Bull. de Liaison des Labo. routiers des P. et C. 20 (juil.-août 1966)
- [29] JOISEL A., *Les fissures du ciment, causes et remèdes*, édité par la Revue des Matériaux de Construction et des T.P. (1962).
- [30] FARRAN J., *Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés. (Thèse)*, Revue des Matériaux de Construction et des T.P. N° 490, 491 et 492 (juillet, août et septembre 1956).
MASO J.-C., *La nature minérale des agrégats, facteur essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel* (Thèse - Toulouse 1967).
- [31] VENUAT M., *Compte-rendu de recherches sur le retrait, le gonflement et la fissurabilité des ciments, mortiers et bétons*, Publication technique N° 116 - C.E.R.I.L.H. (octobre 1960).
- [32] RAVERDY M., *Un perfectionnement pour l'essai de fissurabilité*, Bull. de Liaison des Labo. routiers des P. et C. 39 (août 1969).

Académie de Paris

UNIVERSITE de PARIS VI
II, Quai Saint Bernard - Paris 5

SERVICE DE LA SCOLARITE
Bureau des Enseignements du 3e Cycle

tél. 336.25.25 et 325.12.21

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : . . . d ' E T A T
THESE DE : . . . ES - SCIENCES PHYSIQUES

NOM : . . . B A R O N
Prénoms : . . Jacques
né le 25 Février 1938 . a . . BALLANS . (Charente-Maritime)^tép- : . - .

1ère THESE : " FISSURATION DU BETON PAR HYDRATATION LOCA-
LEMENT DIFFEREE DU CIMENT. "

2e THESE (Propositions faites par l'Université) : " MOUVEMENT DES PARTI-
CULES SUR UN PLAN VIBRANT. "



Vu et Approuvé

PARIS, le . . 22 AVRIL .1971

Le Président

de l'Université de PARIS VI

A handwritten signature in dark ink, consisting of several overlapping loops and strokes.

UNIVERSITE DE PARIS VI
11, rue des Écoles - 75005 Paris
SERVICE DE LA BIBLIOTHEQUE
Bureau des Emprunts de livres
101 200 2022 et 223-224

PERMIS D'IMPRIMER

DECLASSÉ : 21.12.87
LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION

NOUVEAU : 21.12.87
LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION
à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION

à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION
à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION

à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION
à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION

à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION
à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION
à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION



à la 22 Réunion 08 A - LIBRÉ : 21 - OUTREMER-REUNION

